



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**COMPORTAMIENTO DE UN EDIFICIO DE MAMPOSTERÍA  
NO REFORZADA RECRECIDO EN ALTURA EN DISTINTAS  
ETAPAS**



**Memoria**

**Autor:** Rafa Reche Tejero

**Director:** Jorge Arturo Ávila

**Convocatoria:** Junio 2018

## Índice del trabajo

1. Introducción .....	5
2. Introducción histórica .....	7
2.1 Contexto histórico de la ciudad de Barcelona.....	7
2.2 El plan Cerdà.....	8
2.3 El Ensanche.....	10
3. El edificio .....	12
4. Metodología .....	16
4.1 Demanda sísmica .....	16
4.2 Espectro elástico de respuesta.....	17
4.2.1 Espectros de NCSE-02 (Norma de Construcción Sismorresistente) .....	17
4.2.2 Espectro de respuesta generado – NCSE-02 .....	19
4.2.3 Espectro Eurocódigo 8 (EC8) .....	21
4.2.4 Espectro de respuesta generado – EC8.....	23
4.2.5 Espectro de estudio microzonación de Barcelona (Irizarry) .....	25
4.2.6 Justificación del método seleccionado .....	26
4.3 Descripción de los métodos estáticos no lineales.....	27
4.3.1 Modelización de la estructura.....	28
4.3.1.1 Programa de computación 3MURI.....	28
4.3.1.2 Materiales de la estructura .....	29
4.3.2 Análisis Modal .....	30
4.3.3 Método N2 .....	32
4.3.4 Estados límite de daño .....	37
4.4 Curvas de fragilidad de la estructura .....	38
4.4.1 Lecturas de las curvas de fragilidad en función del punto de desempeño obtenido anteriormente .....	40
5. Cálculos y resultados .....	42
5.1 Análisis modal .....	42
5.2 Capacidad vs. Demanda .....	43
5.3 Curvas de fragilidad.....	52
6. Comparativa .....	57
6.1 Análisis Modal .....	57
6.2 Curvas de capacidad.....	57
6.3 Curvas fragilidad.....	57
7. Conclusiones.....	60
8. Presupuesto.....	62

9. Bibliografía .....	63
-----------------------	----

## Índice de imágenes

Figura 1 - Esquema geométrico del Plan Cerdà. Fuente: Arxiu Històric de la Ciutat .....	9
Figura 2 - Detalles geométricos del Ensanche. Fuente: Arxiu Històric de la Ciutat .....	10
Figura 3 - Situación del edificio estudiado Fuente: Google Maps 2018.....	12
Figura 4 - Comparativa de piso “tipo” vs. piso “estudio”. Fuente: Propia 2018 .....	13
Figura 5 - Planta tipo 1900 (izquierda) vs. Planta recrecida 1928 (derecha) caso 1. Fuente: <a href="http://ecbarquitectura.com">http://ecbarquitectura.com</a> .....	14
Figura 6 - Planta tipo 1900 (izquierda) vs. Planta recrecida 1960 (derecha) caso 1. Fuente: <a href="http://ecbarquitectura.com">http://ecbarquitectura.com</a> .....	15
Figura 7 - Mapa de peligrosidad sísmica Fuente: NCSE-02 .....	18
Figura 8 - Espectro elástico de respuesta NCSE-02. Fuente: J.A Ávila 2018 .....	20
Figura 9 - Espectro de respuesta (5% amortiguado) para terreno tipo 1. FUENTE: EC-8 1998 ..	23
Figura 10 - Espectro de respuesta (5% amortiguado) para terreno tipo 2. FUENTE: EC-8 1998	24
Figura 11 - Zonación de la ciudad de Barcelona. Fuente: Cid 2001 .....	25
Figura 12 - Ejemplo curva Push-Over de un edificio de l'Eixample de Barcelona, España (Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018 .....	28
Figura 13 - Imagen en 3D del edificio. Fuente: Propia 2018 .....	29
Figura 14 - Imagen 3D de la aplicación del análisis modal. Fuente: ARQHYS Arquitectura 2018. .....	31
Figura 15 - Desplazamiento planta 7 respecto el inicial. Fuente: Propia 2018 .....	32
Figura 16 - Curva push-over generada por la aplicación de 3MURI. Fuente: Propia .....	33
Figura 17 - Ejemplo curva de sistema equivalente SDOF de un edificio de l'Eixample de Barcelona, España. Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018.....	34
Figura 18 - Ejemplo de espectro de capacidad en formato ADRS de un edificio de l'Eixample de Barcelona, España Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018.....	35
Figura 19 - Curva bilineal del espectro de capacidad de un estudio ejemplo. Fuente: J.A. Ávila- Haro 2018.....	36
Figura 20 - Punto de desempeño de un edificio ejemplo a un $p_{ga}=0,280g$ . Fuente: J.A. Ávila- Haro 2018.....	37
Figura 21 - Curvas de fragilidad de un edificio ejemplo de 6 niveles. Fuente: Propia 2018. ....	39
Figura 22 - Diferentes puntos de desempeño mostrados en las curvas de fragilidad. Fuente: Propia 2018 .....	39
Figura 23 - Probabilidad de daño para una aceleración espectral de $0,04g$ en un edificio ejemplo de Barcelona, España. Fuente: Propia 2018.....	40

Figura 24 - Probabilidad de daño para aceleraciones de 0,02 a 0,3g en un edificio ejemplo de Barcelona, España. Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018. ....	41
Figura 25 - Curva push-over del edificio estudiado en la dirección "X" . Fuente: Propia 2018 ..	43
Figura 26 - Curva push-over del edificio estudiado en la dirección "Y" . Fuente: Propia 2018...	44
Figura 27 - Curva push-over del edificio recrecido en la dirección "X" . Fuente: Propia 2018 ...	45
Figura 28 - Curva push-over del edificio recrecido en la dirección "Y" . Fuente: Propia 2018 ...	45
Figura 29 - Perfomance point para pga 0,04g en la dirección "X" del edificio estudiado. Fuente: Propia 2018 .....	47
Figura 30 - Perfomance point para pga 0,194g en la dirección "X" del edificio estudiado. Fuente: Propia 2018.....	48
Figura 31 - Perfomance point para pga 0,04 en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018.....	48
Figura 32 - Perfomance point para pga 0,194 en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018.....	49
Figura 33 - Perfomance point del edificio recrecido para pga 0,04 en la dirección "X". Fuente: Propia 2018 .....	50
Figura 34 - Perfomance point del edificio recrecido para pga 0,194 en la dirección "X". Fuente: Propia 2018 .....	50
Figura 35 - Perfomance point del edificio recrecido para pga 0,04 en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018 .....	51
Figura 36 - Perfomance point del edificio recrecido para pga 0,194 en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018 .....	52
Figura 37 - Curvas de fragilidad para el edificio estudio. Fuente: Propia .....	53
Figura 38 - Curvas de fragilidad para el edificio estudio. Fuente: Propia .....	53
Figura 39 - Histogramas de daño para el edificio estudio. Aceleración 0,04g (izquierda) y 0,194g (derecha). Fuente: Propia 2018.....	55
Figura 40 - Histogramas de daño para el edificio recrecido. Aceleración 0,04g (izquierda) y 0,194g (derecha). Fuente: Propia 2018.....	56

## 1. Introducción

El uso de mampostería como material constructivo es una práctica común en una gran cantidad de ciudades Europeas y de todo el mundo. Las técnicas constructivas y de fabricación a lo largo de la historia han evolucionado hasta el día de hoy donde se pueden asegurar calidades muy superiores bajo diversos estándares.

Dentro de las ciudades europeas con un gran porcentaje de construcciones pertenecientes a la tipología de mampostería no reforzada se encuentra Barcelona, en España. Así mismo, uno de los distritos más representativos de la ciudad, el denominado Eixample, concentra una gran cantidad de este tipo de estructuras.

Este tipo de construcciones, cuya edificación se llevó a cabo previa a la primera mitad del siglo XX no contempla la acción de cargas horizontales (sísmicas) y solamente se diseñaban para resistir las verticales.

Adicionalmente, una práctica habitual desde el inicio del proyecto de L'Eixample era el recrecido de edificios en una, dos, tres o hasta cuatro plantas conforme las ordenanzas municipales se actualizaban a lo largo del tiempo. Es una práctica que se ha extendido incluso hasta el día de hoy. La importancia de tomar en cuenta la variación en la respuesta estructural de las edificaciones al añadir estas plantas adicionales se vuelve entonces, en una necesidad ya que, como ya se mencionó, el parque urbano correspondiente a esta tipología abarca un gran porcentaje de la totalidad de viviendas en la ciudad de Barcelona, además de que en su gran mayoría dichas estructuras ya han excedido la vida útil para la cual fueron diseñadas inicialmente.

Por otro lado, la caracterización del tipo de terreno de una determinada zona de interés juega un papel crucial para la selección de la demanda plausible a ser aplicada a los edificios de interés. A este respecto existen diversos documentos a nivel nacional, europeo, y en particular estudios de tipo local, cuya aplicación se hace imprescindible ya que recogen información que puede diferir enormemente con los valores recomendados. La selección de la demanda a ser aplicada en un estudio de similares características al actual requiere pues una comparativa exhaustiva acerca de las diferentes opciones y valores a emplear.

Finalmente, la representación del edificio por medio de un modelo estructural es una tarea no trivial. Se ha de tener información veraz y fiable a manera de intentar representar esta realidad de la manera más cercana posible. Dentro de la información necesaria para este propósito podemos mencionar la geometría, distribución de elementos, dimensiones, prácticas constructivas y de fabricación, la calidad de la mano de obra, restricciones existentes debido a las ordenanzas de la época, entre otras.

Una vez realizado el análisis de los modelos estructurales para un edificio de siete plantas y una variante recrecida en dos plantas más, ante una demanda previamente seleccionada, la comparativa entre sus respuestas se hace a partir de varios parámetros calculados a manera de poder facilitar su comprensión.

## 2. Introducción histórica

### 2.1 Contexto histórico de la ciudad de Barcelona

Barcelona es la capital de provincia de Cataluña, región situada al nordeste de España. Es una ciudad situada en la costa del mar Mediterráneo, que limita geográficamente con la sierra de Collserola y los ríos Llobregat y Besós.

La ciudad tiene una superficie de más de 100km<sup>2</sup> con una población de 1.620.809 habitantes, dándole una densidad de 15.992,20 hab/km<sup>2</sup> (Fuente: Idescat Mayo 2018).

De la época romana es de donde sale el nombre original de Barcino "*Cologne Iulia Augusta Faventia Paterna Barcino*", una colonia formada aproximadamente el 10 a.C. El recinto estaba amurallado y cubría una zona de 10,5 ha. Al final del periodo del imperio romano en la ciudad, la ciudad tenía aproximadamente 12.000 habitantes viviendo dentro de las murallas.

No fue hasta el siglo XVIII dónde la ciudad no experimento un cambio exponencial en lo que a población se refiere. La población en 1717 era de 35.928 habitantes, mientras que en 1787 aumentó en prácticamente tres veces más, con el inicio de la revolución industrial en 1750 llegando a 100.160 habitantes. La ciudad empezó a evolucionar a partir de este punto, pero uno de los momentos más importantes fue en 1897 dónde se incluyeron en el censo de la ciudad los pueblos adyacentes incorporándolos como barrios de la misma. La población en este momento ya era de 544.137 habitantes.

El momento más significativo en lo que a crecimiento se refiere, fue en 1840 cuando en ese momento la ciudad estaba amurallada. En ese periodo la ciudad aumento prácticamente en 400.000 habitantes aproximadamente, por lo que, el perímetro que rodeaban las murallas quedó muy pequeño. Se elaboró un plan para el derribo de las murallas pero chocaba con el plan de los ingenieros civiles, que se planteaban fortalecer las murallas, y fue rechazado. La presión que había en el interior de las murallas, provocó problemas graves de higiene, lo cual terminó en revueltas de la población pidiendo el derribo de las mismas. No fue hasta el 1854 cuando finalmente el gobierno central levanto el rechazo al plan de derribo y permitió el crecimiento de la ciudad fuera de las murallas.



Dadas las grandes superficies de terreno que había para el crecimiento de la ciudad, en 1857 se puso a concurso público el proyecto desde el ayuntamiento. Paralelamente, el gobierno central le encargó al ingeniero Ildefons Cerdà, que llevaba desde 1849 encargándose exclusivamente al estudio de la urbanización, un estudio topográfico y una propuesta de ensanche de la ciudad. El concurso público del Ayuntamiento de Barcelona lo ganó el arquitecto Rovira i Trias, aunque desde el gobierno central se adjudicó el proyecto de Ildefons Cerdà, causando mucho revuelo en la oposición. El 31 de mayo de 1860 se publicó el decreto real de puesta en marcha del proyecto ensanche de Cerdà donde la reina Isabel II puso la primera piedra.

## 2.2 El plan Cerdà

El 29 de junio de 1864, 4 años después de la publicación del decreto real que permitía la puesta en marcha del proyecto, salió la *Ley de ensanche de las poblaciones*. Esta ley tumbó el proyecto inicial de Cerdà ya que no contaba con un marco legal adecuado. No obstante, Cerdà participó muy activamente en el control de la construcción y reclamó que las infraestructuras principales del Ensanche se terminaran y aparte reclamó su indemnización.

El Plan de Reforma y Ensanche de Barcelona se considera uno de los proyectos pioneros en la historia del urbanismo moderno. Se caracteriza por tener una visión mucho más amplia que la arquitectónica, porque ya que el plan se basaba en la ampliación de la ciudad arrasando terrenos de campo, consiguió cuajar esa idea con calles anchas y espacios muy verdes. El diseño de Cerdà se basó en una estructura geométrica totalmente lineal. Calles paralelas y perpendiculares que se orientaban de norte a sur o de este a oeste, tan solo se rompían por las grandes avenidas que atraviesan la ciudad.

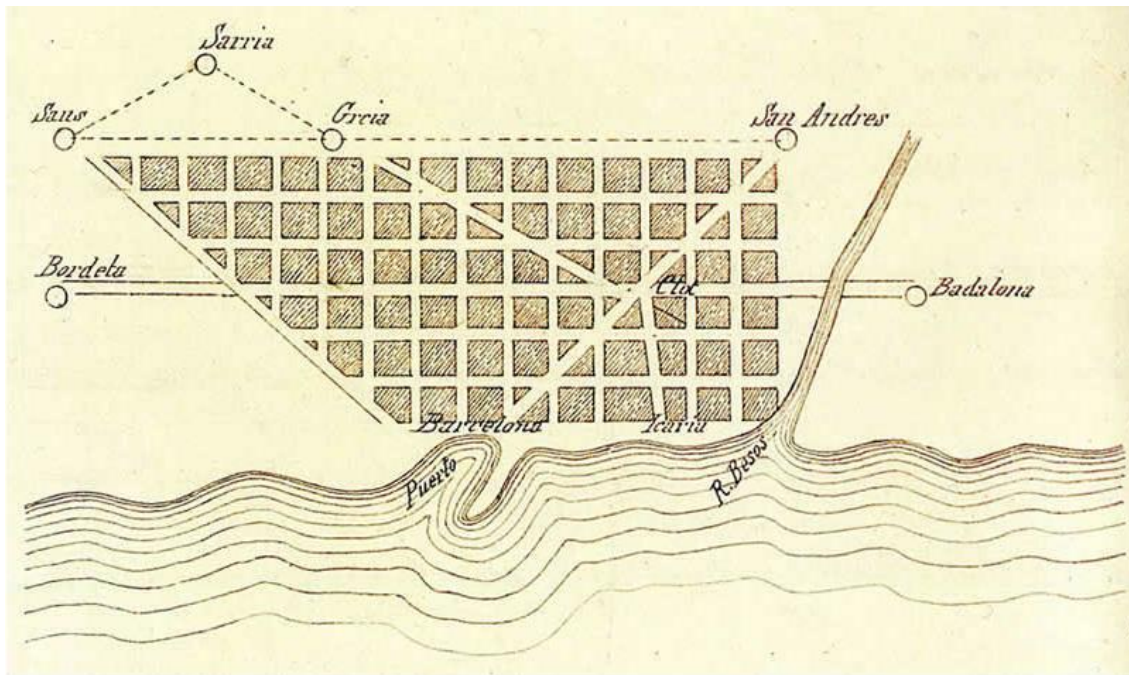


Figura 1 - Esquema geométrico del Plan Cerdà. Fuente: Arxiu Històric de la Ciutat

El plan original de 1859 establecía que las islas o “manzanas” serían de 113m<sup>2</sup> de superficie, la altura máxima de los edificios sería de 16m, es decir, de 4 plantas. Por densidad, el plan establecía que debería haber un mercado cada 900m<sup>2</sup>, un parque cada 1.500m<sup>2</sup>, tres hospitales, un matadero, un cementerio, un bosque y 31 iglesias. Cerdà lo dividió de forma equitativa, para poder dividir los equipamientos. Consideró que las matrices de 5x5 manzanas serían un barrio, cada uno con una escuela y una iglesia. Cada matriz de 10x10, contenía 4 barrios y formarían un distrito. Cada distrito debería tener un mercado. El conjunto de 4 distritos sería un sector, que estos deberían compartir un parque y un hospital. Y por último, 3 sectores tendrían dos grandes parques, un cementerio y un matadero.

Lo que se buscaba con el Plan de Cerdà era una visión equitativa, verde y ordenada de la ciudad. Cada isla tendría una densidad de 20 edificios, con jardines y parques interiores dentro de ellas, mucha luz natural en todos los edificios y se aprovecharía de manera muy importante la dirección de los vientos para facilitar la oxigenación. La anchura que tendrían las calles sería de 20 a 50m, para huir de la densidad que tenía la ciudad y para un futuro de vehículos motorizados (30 años antes de inventarse el automóvil). En el cruce de cada calle incorporó chaflanes de 45º para mejorar la

visibilidad y para incluir un trazado de líneas ferroviarias pero finalmente estas fueron soterradas.

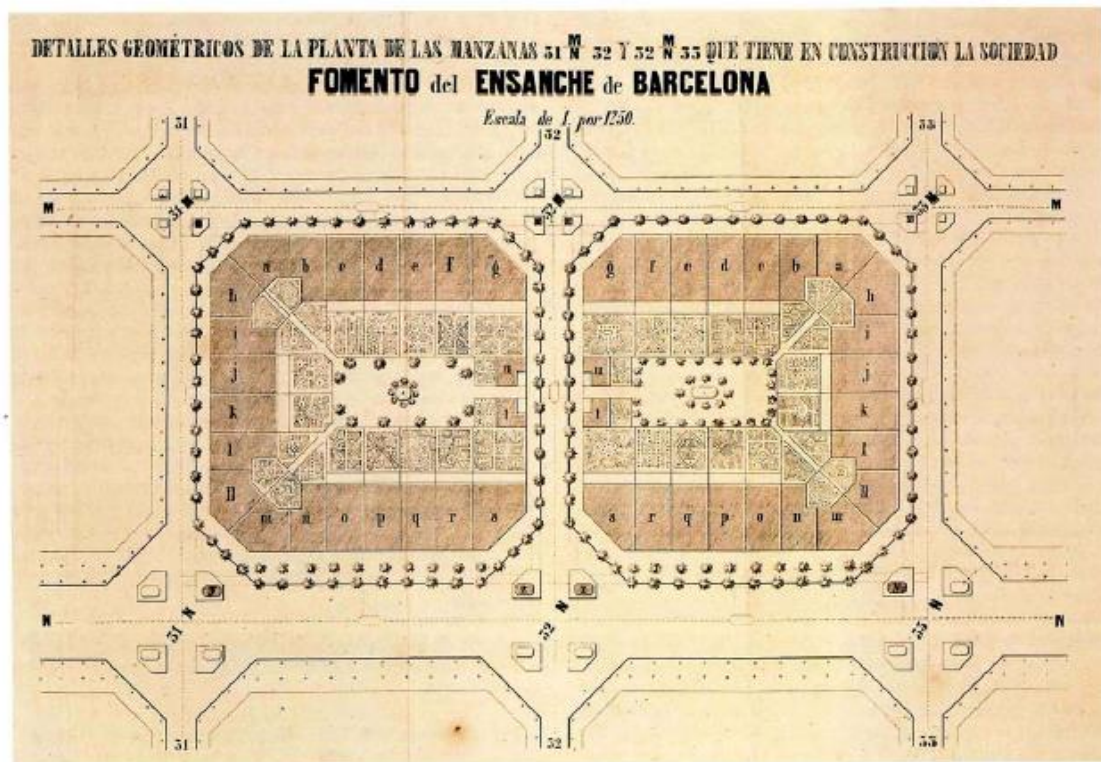


Figura 2 - Detalles geométricos del Ensanche. Fuente: Arxiu Històric de la Ciutat

### 2.3 El Ensanche

El barrio del Ensanche (o l'Eixample, en catalán) es uno de los 10 distritos que tiene la ciudad de Barcelona. En él reside aproximadamente el 15% de la población total de la ciudad y contiene el 12% de los edificios de ella (8.658 edificios). Tiene la densidad de habitantes más grande de la ciudad (aproximadamente 36.000 hab/km<sup>2</sup>) y tiene una superficie total de 7,36km<sup>2</sup>.

La construcción de los edificios de l'Eixample tienen una fecha media que data del 1931, por lo que, la mayoría de edificios de la zona tienen aproximadamente 100 años de antigüedad. El 70% de los edificios son de mampostería no reforzada, por eso que se centra este estudio y trabajo en esa zona (Lantada, 2007).

En el punto 4.3.1.2 *Materiales de la estructura* más adelante, se explica con detalle los materiales con los que se construían en esa época en l'Eixample. En primera instancia,

se utilizó el ladrillo como material principal de construcción para todos los edificios pero a mediados de siglo XX se empezó a substituir por el hormigón armado. El mayor problema que tenía el ladrillo era su fabricación artesanal. Cada ladrillo tenía diferentes propiedades y diferentes resistencias a causa de las proporciones utilizadas y del tiempo de cocción o su posición dentro de los hornos destinados a su producción. También los instrumentos que se utilizaban para la cocción no conseguían tener una temperatura estable en toda su superficie por lo que todos los ladrillos que había en su interior podían tener estados de cocción diferentes.

Este factor fue determinante ya que se utilizaban los ladrillos con mejores propiedades y resistencia en las plantas más bajas, dónde las cargas eran más grandes, y los de menor calidad en las plantas superiores. Hasta que no se añadieron mejoras y procesos de automatización en la fabricación del ladrillo no mejoraron sus prestaciones.

En el modelo de construcción de l'Eixample, según el estudio de Antoni Paricio Casademunt *"Secrets d'un sistema constructiu"* en tres períodos de construcción más uno adicional que podríamos añadir. Se clasifican en el premodernismo (1860-1900), el modernismo (1888-1915) y el postmodernismo (1910-1936). El cuarto periodo que podríamos añadir sería hasta el 1960 donde cambia el modo de construcción y se cambia el ladrillo por el hormigón armado, debido a lo ya comentado de las propiedades poco homogéneas del ladrillo.



### 3. El edificio

El edificio en el que se centrará el estudio está situado en el centro de l'Eixample. El edificio es un edificio central o “de banda”, consta de una planta baja destinada a local comercial y seis plantas superiores para viviendas. Se dispone información específica de este edificio a partir de los archivos de ciudad, siendo representativo de la zona de interés de este trabajo.

Se construyó en el año 1882 y de acuerdo a la clasificación propuesta por Antoni Paricio comentada en el punto anterior, pertenece al periodo premodernista.



*Figura 3 - Situación del edificio estudiado Fuente: Google Maps 2018*

Se considera que l'Eixample se construyó siguiendo un modelo estándar en la distribución de los pisos debido a la sistematización y repetición de la construcción. En la Figura 4 se puede ver la comparativa en el piso tipo (Paricio, 2001) y en el edificio estudiado.

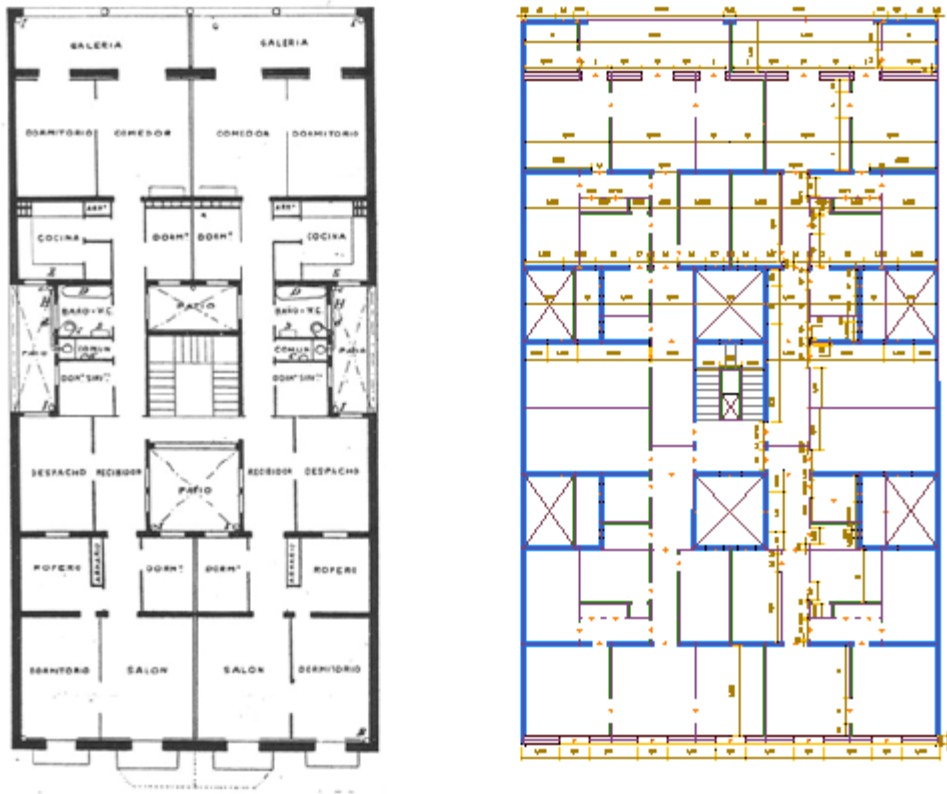


Figura 4 - Comparativa de piso “tipo” vs. piso “estudio”. Fuente: Propia 2018

Según los planos originales del edificio estudio, el edificio de siete niveles tiene una altura en la planta baja de 4m y de 3,2m los otros seis niveles. En planta, el edificio consta de 480,91m<sup>2</sup> construidos. Como se ha comentado, la planta baja tiene una altura mayor y un espacio más diáfano debido a su uso comercial.

La construcción está compuesta mayoritariamente de mampostería no reforzada. Los muros de las fachadas son de dicho material con un espesor de 0,45m en la planta baja y de 0,30m en los otros niveles para las fachadas. Los muros y las paredes medianeras son de un espesor de 0,15m mientras que el resto de muros tienen espesores de 0,10m o menos.

Para el forjado se utilizó el sistema vigueta-bovedilla cerámico, el cual está compuesto de viguetas de acero simplemente apoyadas en las paredes de carga, entre las cuales encontramos las bovedillas cerámicas que permiten distribuir las cargas hacia los lados (González-Drigo et al., 2015).

Para el edificio recrecido a emplear como una de las hipótesis para este trabajo, la técnica que se ha usado ha sido duplicar exactamente la distribución interior del último piso para recrecer dos plantas más. Se ha utilizado este criterio por las similitudes encontradas en dos edificios de la zona con prácticamente las mismas características que el edificio estudio.

El primer edificio constaba inicialmente de planta baja y cinco niveles más. En planta tenía una superficie de 501m<sup>2</sup> y una altura inicial de 23m, ya que está situado en una zona que en su año de construcción (aproximadamente en el 1900) sólo se permitía esta altura máxima en calles no comerciales. Se hizo un recrecido de dos plantas, una sexta planta y el ático, aplicando la misma distribución de los pisos inferiores a los superiores (Figura 5).

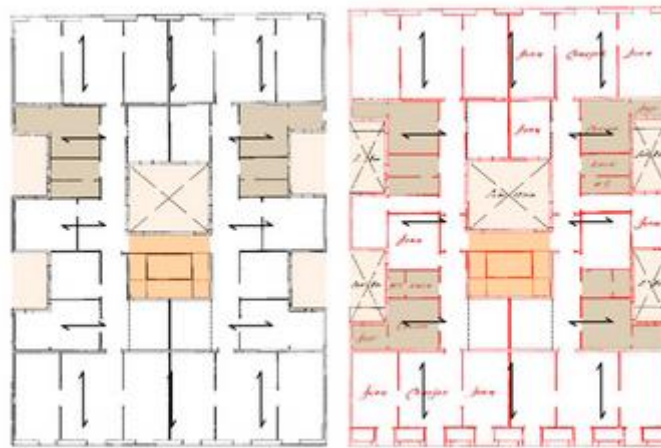


Figura 5 - Planta tipo 1900 (izquierda) vs. Planta recrecida 1928 (derecha) caso 1. Fuente: <http://ecbarquitectura.com>

El otro edificio que se ha cogido de referencia, que inicialmente también disponía de planta baja y cinco niveles superiores. En planta tenía una superficie de 430m<sup>2</sup> y en este caso sólo se ha recrecido en una planta más, llevando a cabo el mismo método de duplicar las plantas (Figura 6).



*Figura 6 - Planta tipo 1900 (izquierda) vs. Planta recrecida 1960 (derecha) caso 1. Fuente: <http://ecbarquitectura.com>*



## 4. Metodología

### 4.1 Demanda sísmica

La descripción más adecuada para la demanda sería la estimación de movimiento del terreno producido por un terremoto. A partir de este movimiento de terreno, se hacen estudios de demanda dependiendo de la zona *sismogénica*<sup>1</sup> en la que esté situado.

Existen varias maneras de hacer un estudio de demanda de una zona en concreto. Lo anterior dependerá en gran medida de la zona en la que estemos basando el estudio, ya que seguramente necesitaremos adecuar los cálculos y hacer diversos comparativos para tener los resultados más realistas posibles.

En algunas ocasiones y por razones muy diversas, la demanda sísmica se ha considerado a partir de estudios realizados en otras zonas, relacionando las condiciones iniciales del estudio con las propias de la zona. Esta forma de hacerlo puede que no sea la más acertada ya que si comparamos los espectros de respuesta de distintos eventos que ocurren en la zona de interés con los que proporciona la norma, pueden observarse resultados significativamente distintos. Este es el caso de la ciudad de Barcelona, España, dónde se enfoca este estudio, la cual se encuentra en una zona de una sismicidad moderada y movimientos tectónicos débiles. Para nuestro estudio se consideran dos normativas vigentes distintas y, así como, un estudio de micro-zonación elaborado para la propia ciudad. La normativa oficial de España es la NCSE-02 (NCSE-02, 2002) permite obtener espectros de demanda para cualquier punto del territorio nacional. Así mismo, y con el objetivo de tener una visión más amplia de las implicaciones que conlleva la correcta elección de la demanda a utilizar, añadiremos a la comparativa los espectros de demanda que nos facilita tanto la normativa Europea EC8 (Eurocode-8-1, 2004), así como los correspondientes al estudio de microzonación obtenidos por Janira Irizarry en su trabajo de tesis doctoral titulado *"An advanced approach to seismic risk assesment. Application to the cultural heritage and the urban system of Barcelona"* en 2004, en el cual subdivide la ciudad de Barcelona en 4 zonas y tipos de terreno diferentes.

Adicionalmente, el documento contempla la consideración de la demanda sísmica desde un punto de vista probabilista y el otro determinista. El escenario determinista evalúa los sismos registrados en la zona, empleando el mayor sismo cuya ocurrencia sea razonable.

---

<sup>1</sup> Zona sismogénica: Zona productora o generadora de sismos asociada a unas ciertas características geotectónicas.

Por otro lado, para el escenario probabilista se utiliza los datos de los sismos registrados para establecer leyes de probabilidad de ocurrencia dentro de la zona. Básicamente, se selecciona el terremoto cuya probabilidad de ocurrencia sea del 10% en un periodo de 50 años, es decir, que tenga un periodo de retorno de 475 años. Para este trabajo se ha elegido el escenario probabilista.

## 4.2 Espectro elástico de respuesta

El espectro elástico de demanda es una representación de las posibles sollicitaciones sísmicas que pueden representarse en una zona determinada. Los espectros se basan en los métodos de cálculo deterministas y probabilistas y además, cada normativa dispone de expresiones que permiten obtener representaciones de dichos espectros. Aspectos como el tipo de terreno que y acontecimientos históricos de la zona son necesarios para su generación, permitiendo así relacionar la aceleración espectral con el periodo del sismo.

Como se ha comentado en el punto anterior, utilizaremos los tres documentos para comparar los espectros de demanda generados para la zona de interés. Las normativas se basan en estudios de macro-zonación y en cambio, el documento de Irizarry, es mucho más concreto ya que es un estudio de micro-zonación de la ciudad de Barcelona.

### 4.2.1 Espectros de NCSE-02 (Norma de Construcción Sismorresistente)

La NCSE-02 define la siguiente expresión para la obtención de la aceleración sísmica básica ( $a_c$ ):

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

Dónde  $a_b$  es, según la NCSE-02, la aceleración sísmica básica (define la peligrosidad sísmica en España) que representa la aceleración con un período de retorno de 500 años. Viene definido por el mapa de peligrosidad sísmica<sup>2</sup> (Figura 7).  $\rho$  es un coeficiente adimensional de riesgo que depende del periodo de vida útil para el que se proyecta la construcción y de la importancia de la misma. En nuestro caso, siempre será  $\rho = 1$  ya que se trata de un edificio de importancia normal.

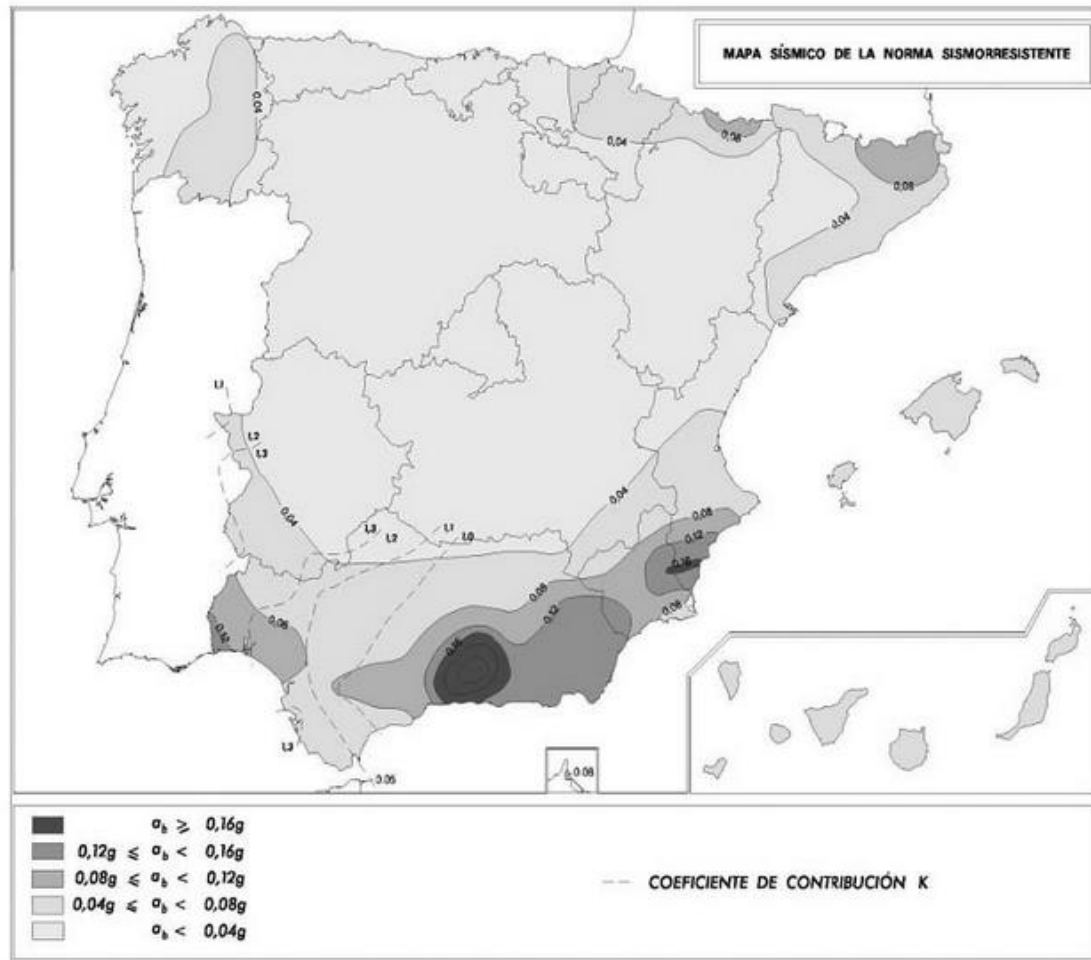


Figura 7 - Mapa de peligrosidad sísmica Fuente: NCSE-02

S es un coeficiente de amplificación del terreno y viene definido por esta expresión:

$$S = \begin{cases} \frac{C}{1,25}, & \rho \cdot a_b \leq 0,01g \\ \frac{C}{1,25} + 3,33 \left( \frac{\rho \cdot a_b}{g} - 0,1 \right) \cdot \left( 1 - \frac{C}{1,25} \right), & 0,01g < \rho \cdot a_b < 0,04g \\ 1, & \rho \cdot a_b \geq 0,04g \end{cases}$$

Dónde C viene determinado por el tipo de terreno dónde se realice el estudio. A continuación se definen los tipos de terreno y los valores que pueda obtener C (Tabla 1):

Tabla 1 - Tipos de suelo de NCSE-02. Fuente: NCSE-02

Tipo	I	II	III	IV
<b>Terreno</b>	Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso	Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros	Suelo granular de compacidad media o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme	Suelo granular suelto o suelo cohesivo blando
<b>Velocidad propagación ondas elásticas</b>	$V_s > 750 \text{ m/s}$	$750 \text{ m/s} \geq V_s > 400 \text{ m/s}$	$400 \text{ m/s} \geq V_s > 200 \text{ m/s}$	$V_s = 200 \text{ m/s}$
<b>C</b>	1	1,3	1,6	2

Por tanto, aplicando la ecuación de la aceleración sísmica básica de la norma NCSE-02 para nuestro caso en la ciudad de Barcelona, sería de estos valores:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

Como hemos comentado, el coeficiente  $\rho = 1$  ya que nuestro edificio es considerado de importancia normal.  $a_b = 0,04 [g]$  si nos fijamos en el mapa de la 'Figura 1'. Entonces, el producto  $\rho \cdot a_b = 0,04 [g]$  por lo que el coeficiente de amplificación de terreno será  $S = 1$ .

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b = 1 \cdot 1 \cdot 0,04 = 0,04 [g]$$

Por lo que, para cumplir esta normativa, debería estar adaptado para un terremoto con una aceleración sísmica básica (*pga*, por las siglas en inglés) de  $pga = 0,04 [g]$ .

#### 4.2.2 Espectro de respuesta generado – NCSE-02

A continuación se muestra la representación del espectro elástico de respuesta que propone la normativa NCSE-02 según el tipo de terreno.

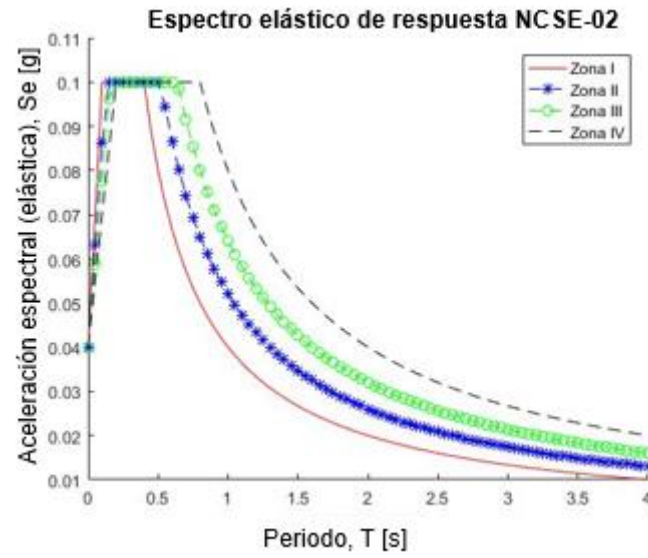


Figura 8 - Espectro elástico de respuesta NCSE-02. Fuente: J.A Ávila 2018

### 4.2.3 Espectro Eurocódigo 8 (EC8)

Al igual que la norma sismorresistente española, la normativa europea contiene disposiciones de proyectos de estructuras para ser considerados sismorresistentes. La finalidad es asegurar tres cosas. Ante todo, asegurar que las vidas humanas estén protegidas, que los daños estructurales e impacto sean lo más limitado posible, y por último, que las estructuras de protección civil no entren en colapso para ser operativas una vez haya pasado el sismo.

Hay una diferencia en el cálculo de la aceleración sísmica básica ( $a_g$ ) respecto la NCSE-02. El cálculo en el Eurocódigo corresponde a un período de retorno de 475 años, en cambio, en la normativa española el periodo de retorno es de 500 años.

El EC-8 define el espectro elástico de repuesta como la representación del movimiento sísmico en un punto dado de la superficie. El espectro elástico de respuesta,  $S_e(T)$ , para el período de retorno de 475 años, se define como:

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g S \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (\eta 2,5 - 1) \right] & 0 \leq T \leq T_B \\ a_g S \eta 2,5 & T_B \leq T \leq T_C \\ a_g S \eta 2,5 \left( \frac{T_C}{T} \right) & T_C \leq T \leq T_D \\ a_g S \eta 2,5 \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right) & T_D \leq T \leq 4 s \end{cases}$$

Dónde:

- $S_e(T)$  = Ordenada del espectro elástico de respuesta
- $T$  = periodo, en segundos
- $a_g$  = aceleración sísmica básica de cálculo del terreno
- $S$  = parámetro del suelo
- $\eta$  = factor de corrección por amortiguamiento (=1 para casos de amortiguamiento al 5%)
- $T_B$  = límite inferior del periodo del espectro de aceleración
- $T_C$  = límite superior del periodo del espectro de aceleración
- $T_D$  = valor que define el comienzo del tramo constante

Los valores de estas variables ya han estado seleccionados para que las ordenadas que definen el espectro elástico de respuesta tengan la misma probabilidad de excedencia para todos los periodos, del 50%, y según el tipo de terreno (terreno 1 y 2 por magnitudes superiores e inferiores a 5,5 en la escala de Richter, respectivamente (Tabla 2):

Tabla 2 - Valor numérico de las variables según tipo terreno. Fuente: EC-8 1998

Tipo	Terreno 1				Terreno 2			
	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1	0,15	0,4	2	1	0,05	0,25	1,2
B	1,2	0,15	0,5	2	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,15	0,2	0,6	2	1,5	0,01	0,25	1,2
D	1,35	0,2	0,8	2	1,8	0,01	0,3	1,2
E	1,4	0,15	0,5	2	1,6	0,05	0,25	1,2

El Eurocódigo distingue en 5 tipos de suelo diferentes según las condiciones locales de este (Tabla 3):

Tabla 3 - Características de terreno de acuerdo a EC8. Fuente: EC-8 1998

Tipo	Descripción	Velocidad de onda [m/s]
A	Roca u otra formación geológica incluyendo como máximo 5m del material más débil de la superficie	$V_s > 800$
B	Depósitos compactos de arena, grava o arcilla sobre-consolidada de varis decenas de metros de espesor	$800 > V_s > 360$
C	Depósitos profundos de arenas de densidad medi, gravas o arcillas de consistencia media con espesores de algunas decenas a muchos centenares de metros	$360 > V_s > 180$
D	Depósitos de suelo suelto no cohesivo, con o sin algunas capas de débil cohesión	$180 > V_s$
E	Perfil de suelo formado por una cala aluvial superficial y con un espesor de entre 5 a 20m	

#### 4.2.4 Espectro de respuesta generado – EC8

Las Figura 9 y Figura 10 muestran los dos tipos de espectros elásticos de repuesta obtenidos de la propia normativa europea clasificados según el tipo de terreno, si es superior o inferior a 5,5 en la escala de Richter:

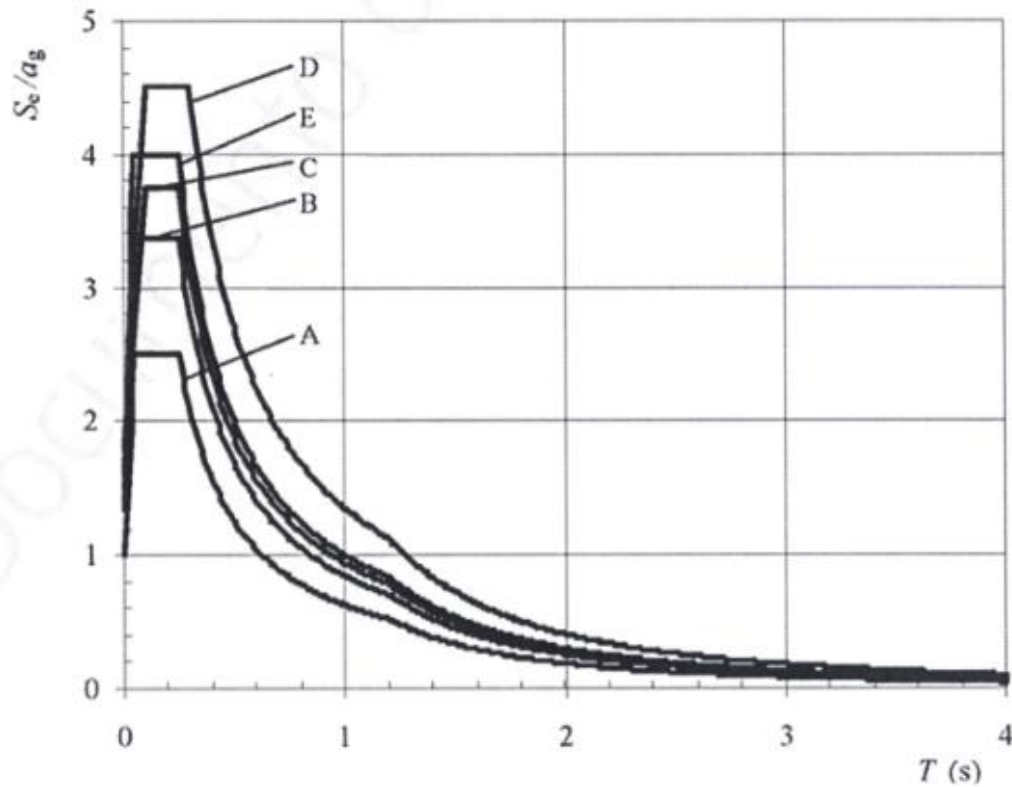


Figura 9 - Espectro de respuesta (5% amortiguado) para terreno tipo 1. FUENTE: EC-8 1998



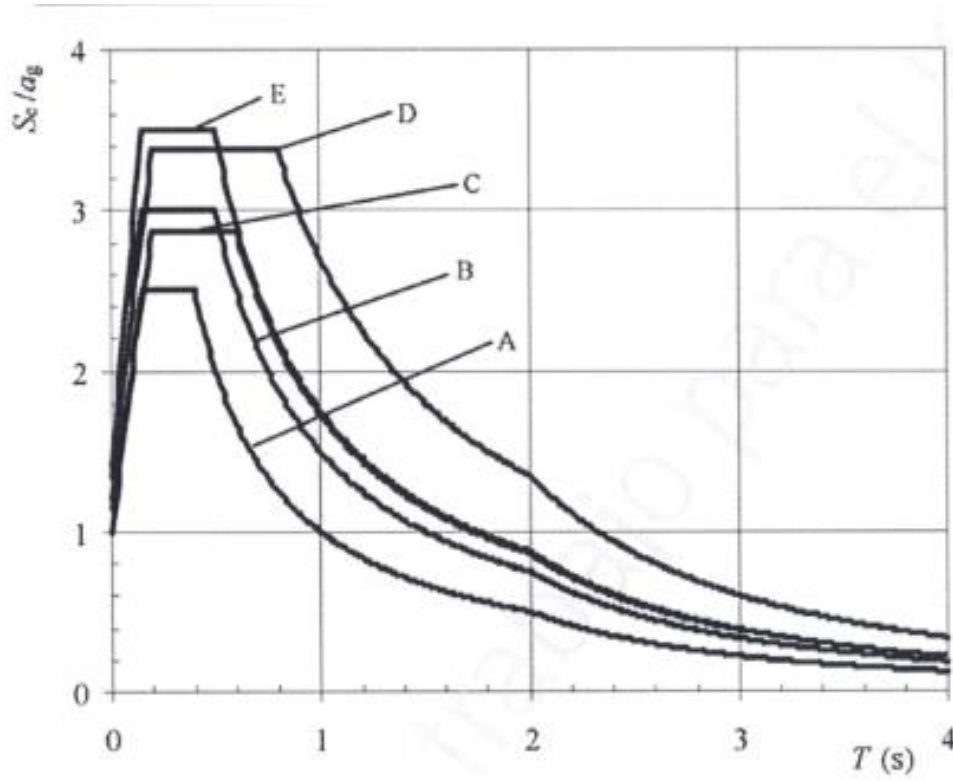


Figura 10 - Espectro de respuesta (5% amortiguado) para terreno tipo 2. FUENTE: EC-8 1998

#### 4.2.5 Espectro de estudio microzonación de Barcelona (Irizarry)

Debido a la realización del estudio que se realizó para el análisis estructural de edificios construidos anteriormente a cualquier normativa sísmica, el RISK-UE (Milutinovic y Trendafiloski et al. 2003), se planteó para la ciudad de Barcelona, España, nuevos parámetros de respuesta elástica basados en un estudio de microzonación de la ciudad (Cid, Susagna et al. 2001). De esta microzonación, se hizo una propuesta de cálculo (Irizarry, 2004).

En este estudio también se realizó a través de las dos hipótesis de cálculo, el método probabilista y el método determinista. Como se ha comentado en el punto anterior, este trabajo se hará bajo el método probabilista.

La propuesta nos permite obtener con mejor precisión el espectro elástico de respuesta para nuestro edificio ya que está basado en la ciudad en la que realizamos el estudio. Para ello, se dividió la ciudad en cuatro zonas diferentes (Figura 11):

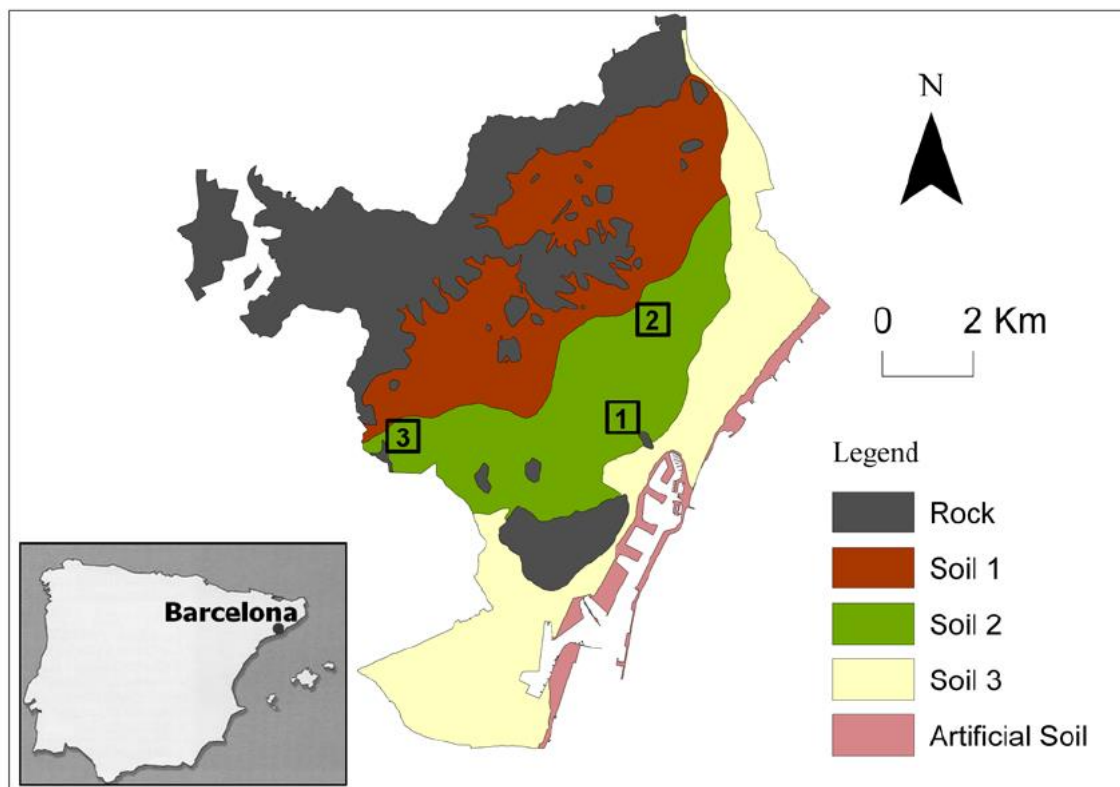


Figura 11 - Zonación de la ciudad de Barcelona. Fuente: Cid 2001

Irizarry, en el método de cálculo, define el espectro elástico de respuesta en cuatro tramos:

$$S_a(T) = \begin{cases} pga \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (B_c - 1) \right] & 0 \leq T \leq T_B \\ pga B_c & T_B \leq T \leq T_c \\ pga \left( \frac{T_c}{T} \right) B_c & T_c \leq T \leq T_D \\ pga \left( \frac{T_c T_D}{T^2} \right) B_c & T_D \leq T \leq 4 s \end{cases}$$

Dónde:

- $S_a(T)$  = Ordenada del espectro elástico de respuesta
- $T$  = periodo de oscilación, en segundos
- $pga$  = aceleración sísmica básica o *peak ground acceleration*
- $B_c$  = factor definido como  $S_{aMAX} / pga$
- $T_B$  = límite inferior del periodo del espectro de aceleración
- $T_c$  = límite superior del periodo del espectro de aceleración
- $T_D$  = valor que define el comienzo del tramo constante

Y estos son los parámetros definidos por Irizarry para poder hacer el cálculo del espectro elástico de respuesta (Tabla 4). Destacar que el edificio del estudio está situado en la zona II:

Tabla 4 - Valores de las variables. Fuente: Irizarry 2004

Tipo	$pga$	$T_B$	$T_c$	$T_D$	$B_c$
I	0,188	0,100	0,400	2,850	2,000
II	0,194	0,100	0,230	2,210	2,500
III	0,169	0,100	0,190	1,770	2,570
R	0,100	0,100	0,250	1,750	2,290

#### 4.2.6 Justificación del método seleccionado

Para este estudio se utilizará de referencia el estudio realizado por Irizarry en 2004 para evaluar la demanda sísmica del edificio, ya que al ser un estudio realizado en la misma ciudad en la que se sitúa el edificio, será mucho más concreta. Así como, se hará una comparativa de los resultados obtenidos con las aceleraciones que proponen la normativa española y europea de 0,04g con la que propone el estudio de Irizarry, de 0,194g y qué afectación tendrá el edificio según la demanda que predicen cada uno.

### 4.3 Descripción de los métodos estáticos no lineales

Los métodos estáticos no lineales (NSP, por sus siglas en inglés *Non-linear static procedure*) permiten con suficiente precisión determinar los parámetros de respuesta sísmica en una estructura. Una estructura está compuesta por diferentes elementos modelados por relaciones matemáticas no lineales. Por tanto, estos métodos aplican un patrón de cargas estáticas monotónicamente incrementales a estas estructuras hasta se alcanza un último estado.

Actualmente, hay diferentes métodos NSP. Algunos se han desarrollado últimamente u otros se han adaptado a partir de otros métodos. A pesar de haber diferentes métodos, todos comparten una base común y los objetivos descritos. Algunos de estos métodos se han incorporado en códigos técnicos y guías de construcción de determinados países.

El objetivo de los métodos NSP consiste en comparar la capacidad propia del edificio con la demanda del sismo para encontrar el denominado punto de desempeño (o *performance point*). Esta comparación se hace enfrentando la curva de capacidad del edificio (o *push-over*) con el espectro elástico de respuesta del sismo, ambas en formato ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra, por sus siglas en inglés).

La curva *push-over* es la gráfica resultante de aplicar un patrón de cargas monotónico creciente de la estructura en cada una de sus direcciones principales. Al aplicar esta carga, graficaremos cogiendo de referencia el nodo de control (NC), que normalmente será el centro de masas de la estructura, la relación entre el desplazamiento del techo (*roof displacement*,  $\Delta_{roof}$ ) y el correspondiente cortante de la base del edificio ( $v_{base}$ ) (Figura 12).

Esta curva la obtendremos del programa de computación *3Muri* en el siguiente punto, 4.3.1 – *Modelización de la estructura*, entraremos en detalle de cómo trabaja este programa.

Para poder hacer la comparación de la demanda y la capacidad, deberemos transformar la curva *push-over* a espectro de capacidad, en formato *ADRS*, para tener las dos gráficas en un sistema equivalente de formato y unidades.

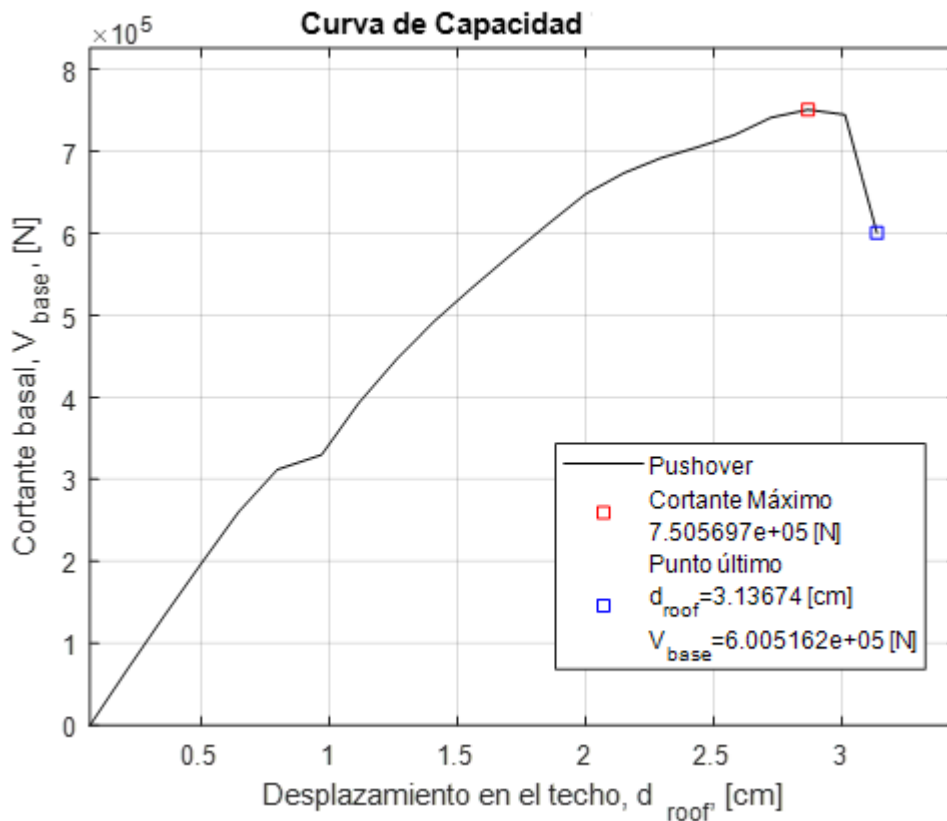


Figura 12 - Ejemplo curva Push-Over de un edificio de l'Eixample de Barcelona, España (Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018)

El primer método conocido fue el CSM (*The Capacity Spectrum Method*) propuesto por Freeman *et al.* 1975 y está contemplado en la guía ATC-40 (ATC-40, 1996). Este método se hizo para estructuras muy concretas de hormigón armado, por lo que nosotros utilizaremos otro método NSP.

El método que se aplicará será el N2, propuesto por Fajfar (Fajfar, 1999; Fajfar & Fischinger, 1988; Fajfar & Gašperšič, 1996). Se basa en gran medida en el procedimiento descrito en el CSM, teniendo como principal diferencia el uso de un espectro de respuesta inelástico de demanda que se determina a través de los espectros elásticos de respuesta mediante reducción de factores. Este método está contemplado en la normativa europea EC-8, aunque en la normativa se han hecho algunas modificaciones respecto al método N2 original.

#### 4.3.1 Modelización de la estructura

##### 4.3.1.1 Programa de computación 3MURI

Para la modelización de la estructura del edificio en estudio se ha usado el programa 3Muri diseñado por la Universidad de Génova por los profesores Gambarotta y Lagomarsino (Galasco, Lagomarsino, & Penna, 2002; S.T.A. DATA, 2012). Este programa permite el análisis estático no

lineal en tres dimensiones de estructuras de mampostería no reforzada (*URM*, en adelante, por sus siglas en inglés, *Unreinforced masonry*) combinados con otros elementos. El programa está basado en un modelo de macro elementos para representar los paneles de mampostería y considera el daño estructural por medio de modelos constitutivos de estudios reales de estructuras URM que han sufrido de acciones sísmicas.

Este modelo está especialmente diseñado para la modelización y análisis de estructuras URM, a diferencia de otros que están especializados en estructuras de hormigón armado o de acero.

La Figura 13 muestra el modelo tridimensional generado con el programa de 3Muri.

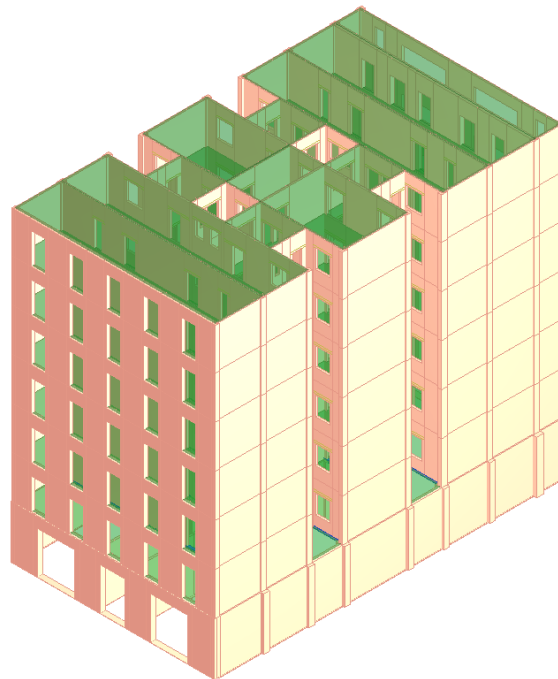


Figura 13 - Imagen en 3D del edificio. Fuente: Propia 2018

#### 4.3.1.2 Materiales de la estructura

La descripción del edificio de mampostería no reforzada (URM) escogido se hará en el siguiente punto 3 – *El Edificio*, pero para el cálculo computacional se necesita la descripción de los materiales de la estructura, y así como los valores que tendrán sus propiedades mecánicas.

El edificio se construyó entre los años 1860 y 1940 aproximadamente. En este periodo, la fabricación de los materiales de construcción se llevaba a cabo por medio de un proceso totalmente manual, por lo que, cada pieza por individual podía tener diferentes características y calidades de acabado y resistencia.

En el propio edificio podemos encontrar diferentes calidades de materiales dependiendo de la carga que han de resistir y de la localización de los muros.

El valor de las propiedades mecánicas de los materiales de la estructura es necesario para poder modelarla e introducir estos datos en el programa. Las propiedades que se estudiarán para la modelación de la estructura serán la resistencia a compresión ( $f_m$ ), el módulo de Young ( $E$ ), módulo de cizalla ( $G$ ) y la resistencia a cizalla ( $\tau$ ).

Para determinar las propiedades mecánicas que tendrán los materiales, al no ser homogéneos como ya hemos comentado, nos hemos basado en un estudio estadístico realizado por el departamento RMEE, dónde se analiza una muestra de  $n=1000$  valores aleatorios generados bajo una distribución normal dónde previamente se han establecido los límites inferiores y superiores de dicha distribución. Los valores resultantes del estudio están en la siguiente tabla (Tabla 5):

Tabla 5 - Propiedades mecánicas de la mampostería, en MPa. Fuente: J.A. Ávila 2018

Propiedades	Límite inferior	Valor medio	Límite superior
Resistencia a compresión ( $f_m$ )	215	300	385
Módulo de Young ( $E$ )	107.500	150.000	192.500
Módulo de cizalla ( $G$ )	35.833	50.000	64.167
Resistencia a cizalla ( $\tau$ )	6	9	12

Con estos valores de propiedades mecánicas y con la estructura modelada, se podrá llevar a cabo el análisis modal y el análisis *push-over* para cada dirección de interés de la estructura.

#### 4.3.2 Análisis Modal

Primero de todos aplicamos el análisis modal con la aplicación de 3Muri. El análisis modal permite obtener una estimación de los desplazamientos de masa y fuerzas en los elementos de un sistema estructural. A modo de simplificación, lo que hace este análisis es inducir vibraciones en la base de la estructura y determinar por cada modo de un cierto periodo qué porcentaje de masa se ha desplazado en cada dirección. La Figura 14 es representativa de cómo se aplicaría este análisis:



Figura 14 - Imagen 3D de la aplicación del análisis modal. Fuente: ARQHYS Arquitectura 2018.

Para ello, la aplicación de 3Muri hace una simulación y facilita una tabla con cada nodo de vibración con su periodo y la masa desplazada en cada dirección:

Tabla 6 - Tabla de modos de vibración en la dirección "X". Fuente: Propia 2018

Modo	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]
1	0,7438	2.139.460	84,24	2	0
2	0,649	73.898	2,91	2	0
3	0,2611	250129	9,85	54	0

Tabla 7 - Tabla de modos de vibración en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018

Modo	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]
1	0,7701	2	0	1.889.445	74,4
2	0,2569	37	0	353.718	13,93
3	0,1505	2	0	108.943	4,29

Como se puede observar en las tablas Tabla 6 y Tabla 7 los tres primeros modos de vibración en la dirección "X" mueven el 97% de la masa y los tres primeros modos en la dirección "Y" el 93% de la masa. Lo que es muy representativo es que en los dos primeros modos de vibración es donde la estructura sufre un mayor desplazamiento de masa en ambas direcciones (un 74,40% y un 84,24% en la dirección "Y" y "X" respectivamente).

Lo anterior se puede apreciar de forma más clara en la Figura 15 la cual muestra el desplazamiento de la planta 7 del edificio respecto a la disposición de muros inicial antes del análisis.



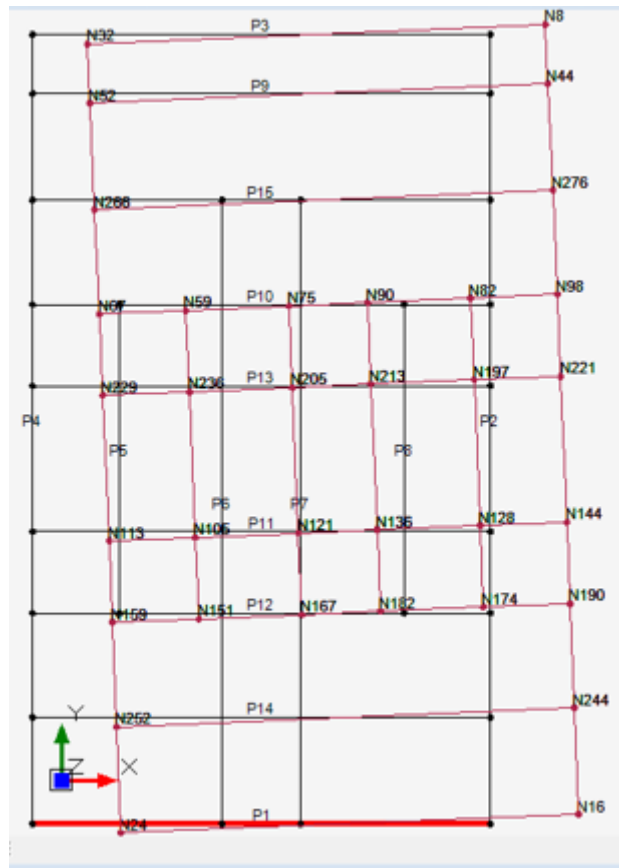


Figura 15 - Desplazamiento planta 7 respecto al inicial. Fuente: Propia 2018

#### 4.3.3 Método N2

Tal y como se comenta en el punto 4.3 – *Descripción de los métodos estáticos no lineales*, el método que se utilizará en este estudio para el cálculo de capacidad del edificio será el propuesto por Peter Fajfar, de la Universidad de Lubljana, Eslovenia, en 1999; el método N2.

El procedimiento a seguir en este método se ha descrito de manera general en el punto anterior 4.3.2 – *Análisis modal*. Con los datos que se disponen del edificio, se graficarán las curvas push-over en las dos direcciones ('X' y 'Y'). Mediante el uso del programa de cálculo *3MURI* se obtendrán los valores numéricos de la curva de capacidad del edificio. Estos datos se posprocesan mediante códigos desarrollados para este trabajo en el programa de cálculo *Matlab* (Mathworks, 1984).

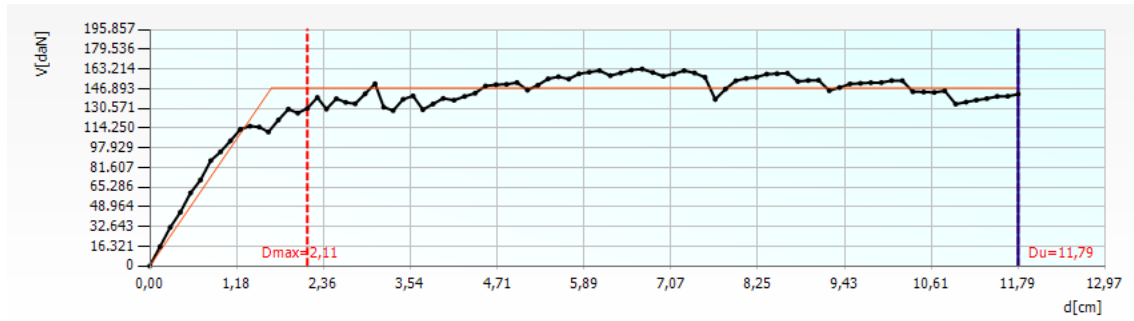


Figura 16 - Curva push-over generada por la aplicación de 3MURI. Fuente: Propia.

El objetivo al enfrentar la curva de capacidad de la estructura con la demanda del sismo y es la obtención del desempeño del edificio. Para ello, debemos comparar los dos gráficos, el espectro elástico de respuesta y la curva de capacidad. Lo anterior se logra al convertir la curva de capacidad en un espectro de capacidad en formato *ADRS*, para que así ambas curvas tengan las mismas unidades.

Dentro de lo establecido por el modelo N2 se ha de realizar la transformación de un sistema con múltiples grados de libertad (MDOF, por sus siglas en inglés, *muti degree-of-freedom*) a un sistema de un solo grado de libertad (SDOF, por sus siglas en inglés), el cual será representado posteriormente a través de una curva bilineal.

Para realizar la transformación de un sistema MDOF a uno SDOF, se deberá buscar primero una fuerza equivalente de la carga que está recibiendo la estructura con el método N2. Posteriormente se calcula la masa equivalente del edificio.

Para obtener el la fuerza equivalente empleamos:

$$f = M\Phi = \begin{Bmatrix} m_1 & & & & & \\ & m_2 & & & & \\ & & m_3 & & & \\ & & & m_4 & & \\ & & & & m_5 & \\ & & & & & m_6 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{Bmatrix}$$

Y para obtener la masa equivalente:

$$m^* = \sum m_i \cdot \Phi^2$$

Finalmente el factor de conversión se obtiene de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{\Phi^T M \cdot 1}{\Phi^T M \Phi} = \frac{m^*}{L^*} = \frac{\begin{Bmatrix} d1 \\ d2 \\ d3 \\ d4 \\ d5 \\ d6 \end{Bmatrix}^T \cdot \begin{Bmatrix} m1 & m2 & m3 & m4 & m5 & m6 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}}{\begin{Bmatrix} d1 \\ d2 \\ d3 \\ d4 \\ d5 \\ d6 \end{Bmatrix}^T \cdot \begin{Bmatrix} m1 & m2 & m3 & m4 & m5 & m6 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d1 \\ d2 \\ d3 \\ d4 \\ d5 \\ d6 \end{Bmatrix}}$$

3MURI calcula y devuelve este factor de conversión ( $\gamma$ ) directamente, así como la masa equivalente del sistema. Aplicando el factor de conversión, se transforman los espectros del sistema MDOF a un sistema SDOF (Figura 17):

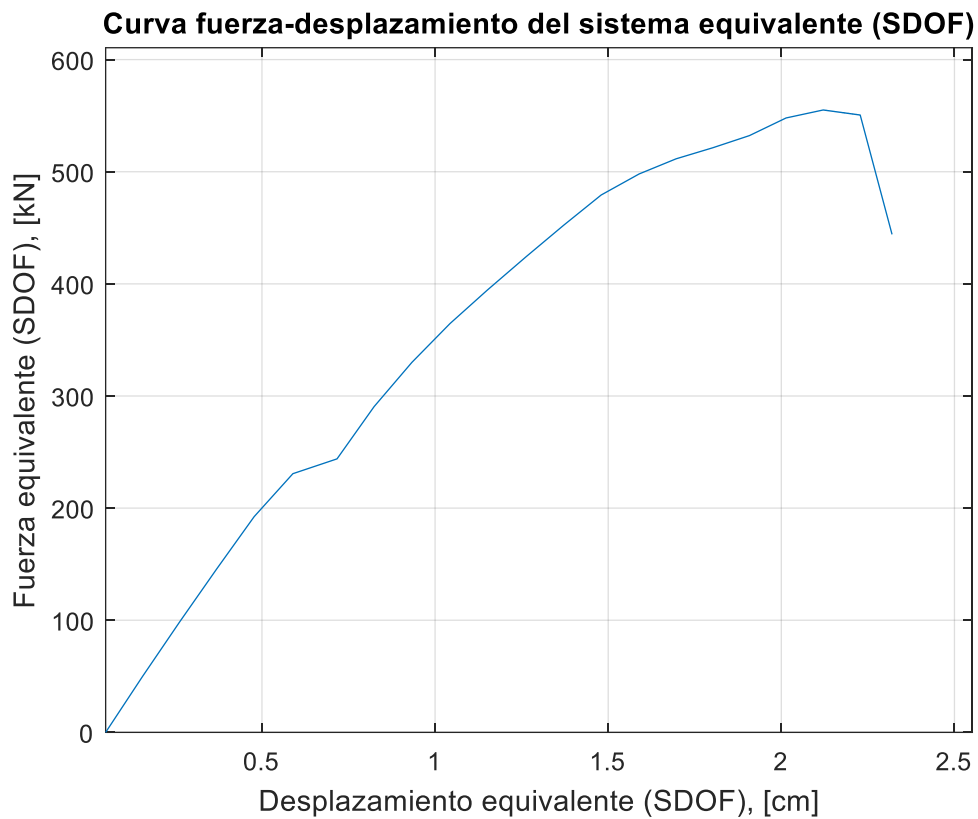


Figura 17 - Ejemplo curva de sistema equivalente SDOF de un edificio de l'Eixample de Barcelona, España. Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018

Finalmente, se transforman las curvas de capacidad en el sistema equivalente SDOF a un formato ADRS, para poderlo comparar correctamente con el espectro de demanda (Figura 18).

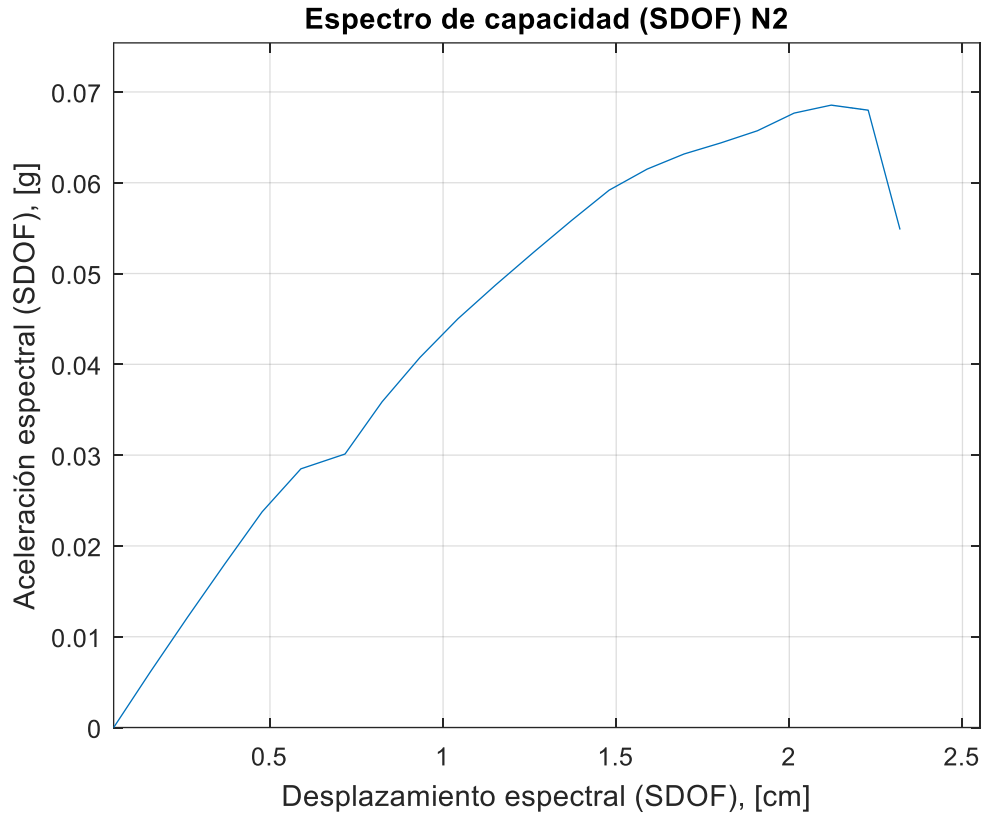


Figura 18 - Ejemplo de espectro de capacidad en formato ADRS de un edificio de l'Eixample de Barcelona, España  
Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018

Para representar la curva bilineal seguiremos el método descrito por N2. El programa 3Muri en este caso utiliza otras premisas y la representación bilineal no es exactamente igual que la obtenida en el programa Matlab.

Los tres pasos que dictamina el método N2 son los siguientes. 1) Para representar la curva bilineal, el último punto será el punto de cortante máximo. Este es fácilmente identificable ya que es el punto más alto en el espectro de capacidad. 2) El área que hay debajo de la curva debe de ser la misma que en la representación bilineal. 3) El pendiente de la zona elástica de la curva bilineal ha de ser igual que el del espectro de capacidad. Con estos *in-puts* podremos representar la curva bilineal del espectro de capacidad (Figura 19).

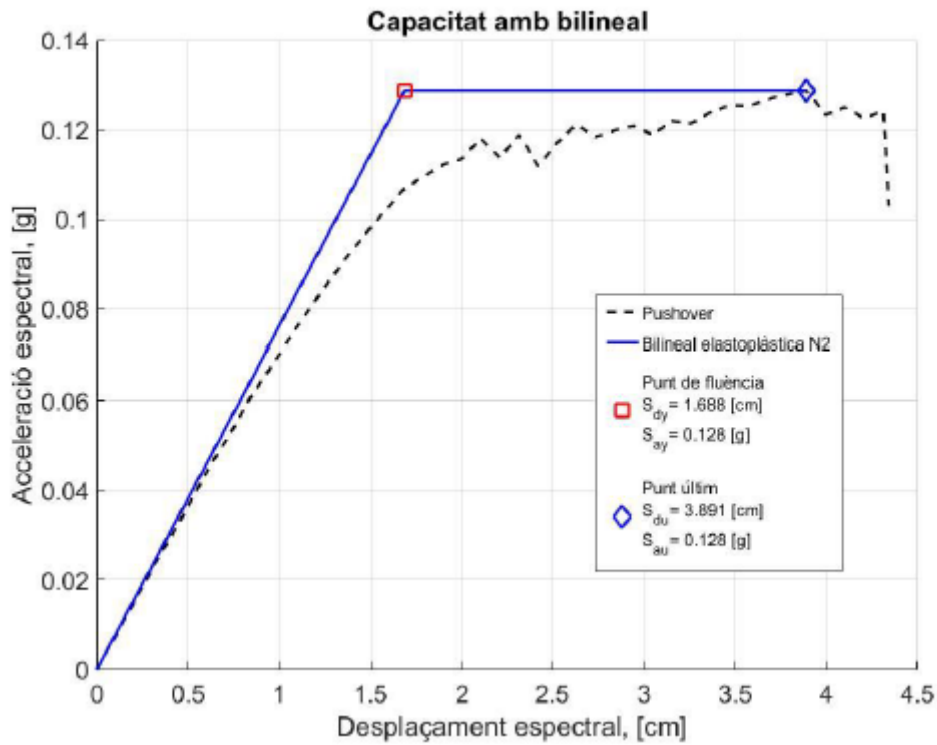


Figura 19 - Curva bilineal del espectro de capacidad de un estudio ejemplo. Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018

La representación bilineal nos permite identificar de una manera más sencilla los puntos de fluencia y últimos, con los cuales podemos obtener la ductilidad del edificio. Es decir, la capacidad de deformación que tiene el edificio antes agotar su capacidad.

$$\mu = \frac{du}{dy}$$

Una vez representadas la demanda y la capacidad en forma espectral, es posible realizar la comparativa con las mismas unidades y obtener el punto de desempeño del edificio. Este punto nos marca el desplazamiento inducido en nuestro edificio ante la demanda introducida. Viene dado por el cruce entre el pendiente de la zona elástica de la bilineal hasta cortar con el espectro de demanda inelástico (Figura 20). Mayores detalles respecto a la obtención del espectro de respuesta inelástico pueden encontrarse en los distintos trabajos publicados por el autor del método N2, tópico que escapa a los alcances de este estudio.

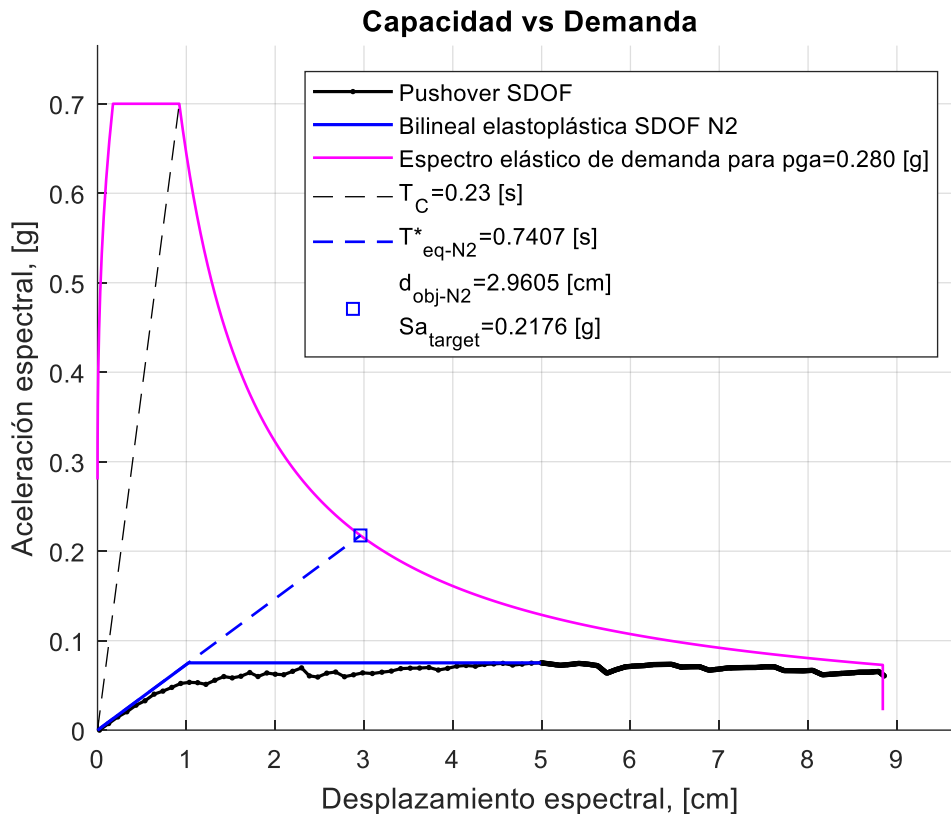


Figura 20 - Punto de desempeño de un edificio ejemplo a un  $p_{ga}=0,280g$ . Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018

#### 4.3.4 Estados límite de daño

Debido a la poca información que se tenía de la estructura de los edificios construidos antes de la regulación por alguna norma de edificación, como los edificios de l'Eixample por ejemplo, se creó una comisión europea para el estudio estructural de los mismos.

El estudio que realizó esta comisión se llamó RISK-UE (Milutinovic & Trendafiloski, 2003) y se realizó en varias ciudades tales como Barcelona, Bucarest y Thessaloniki. Para el estudio, se utilizaron dos métodos: el primero se basaba en el análisis de edificios que entraban dentro de las diferentes categorías y habían sido afectados por un sismo, entonces de estos se analizó el terremoto sufrido en la región y el mecanismo de falla del edificio. El segundo método fue el estudio analítico de estructuras por métodos simplificados.

De este proyecto, nosotros nos basaremos en el método LM2, que analiza la vulnerabilidad sísmica del edificio basándose en estudios espectrales de desplazamiento, velocidad y aceleración. Define cinco estados de daño: Estado 0 o de no daño, estado 1 o de daño leve, estado 2 o de daño moderado, estado 3 o de daño severo y estado 4 o de colapso.

Este método describe las ecuaciones que definen cada estado de daño basándose en la representación bilineal de la capacidad y asigna cuatro puntos de desplazamiento que definirán los desplazamientos espectrales de cada estado de afectación (Lagomarsino, Galasco et al. 2002) (Tabla 8):

Tabla 8 - Estados de daño. Fuente: RISK-UE 2003

Ecuación	Estado de daño
$Sd_1 = 0,7 \cdot Dy$	Leve
$Sd_2 = Dy$	Moderado
$Sd_3 = Dy + 0,25 (Du - Dy)$	Severo
$Sd_4 = Du$	Colapso

#### 4.4 Curvas de fragilidad de la estructura

Las curvas de fragilidad se generan a partir de la suposición de que la probabilidad de alcanzar o exceder un diferente estado de daño siga una distribución lognormal. Esta suposición está expuesta en el proyecto RISK-UE para los cuatro estados de daño expuestos en el apartado anterior (1-4) y el estado de daño 0 (sin daño).

Esta probabilidad se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$P[ED \geq ED_i | S_d] = \phi \left[ \frac{1}{\beta_{ED_i}} \ln \left( \frac{S_d}{\overline{S_{d,ED_i}}} \right) \right]$$

Dónde:

- $\overline{S_{d,ED_i}}$  es el valor medio del desplazamiento espectral en el cual la estructura alcanza el umbral del estado de daño
- $S_d$  es el desplazamiento espectral
- $\beta_{ED_i}$  es la desviación estándar del logaritmo natural de este desplazamiento espectral
- $\Phi$  es la función de distribución normal estándar acumulada
- $i$  representa los estados de daño.  $i=0$  estado de no daño,  $i=1$  estado leve,  $i=2$  estado moderado,  $i=3$  estado severo y  $i=4$  estado de colapso.

La Figura 21 muestra las curvas de fragilidad obtenidas para un edificio ejemplo de 6 plantas de mampostería no reforzada:

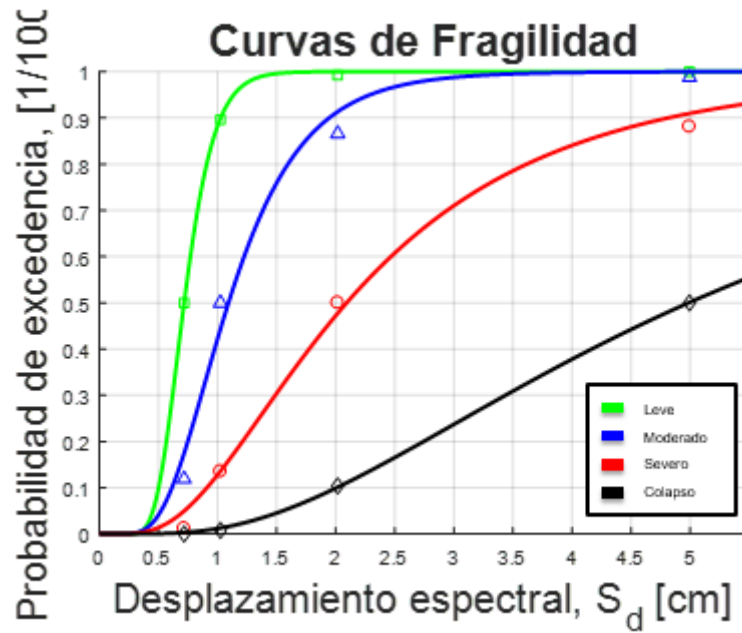


Figura 21 - Curvas de fragilidad de un edificio ejemplo de 6 niveles. Fuente: Propia 2018.

La Figura 22 muestra diferentes puntos de desempeño obtenidos como se verían representados en las curvas de fragilidad. Los puntos de cruce de cada línea con el punto de desempeño determina la probabilidad de que ese suceso ocurra. Hay formas de representación que facilitan la lectura de estas probabilidades, como se muestra en el apartado siguiente.

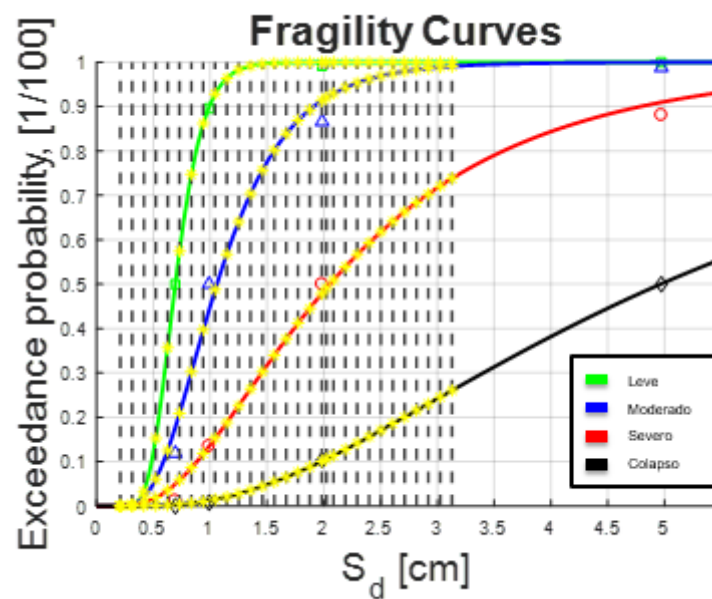


Figura 22 - Diferentes puntos de desempeño mostrados en las curvas de fragilidad. Fuente: Propia 2018



#### 4.4.1 Lecturas de las curvas de fragilidad en función del punto de desempeño obtenido anteriormente

Para mejorar la lectura de las curvas de fragilidad, se representa el gráfico de curvas de fragilidad como probabilidades únicas de daño para cada estado.

De esta manera, así quedarían los siguientes gráficos para un  $pga$  determinado en el edificio del estudio (Figura 23):

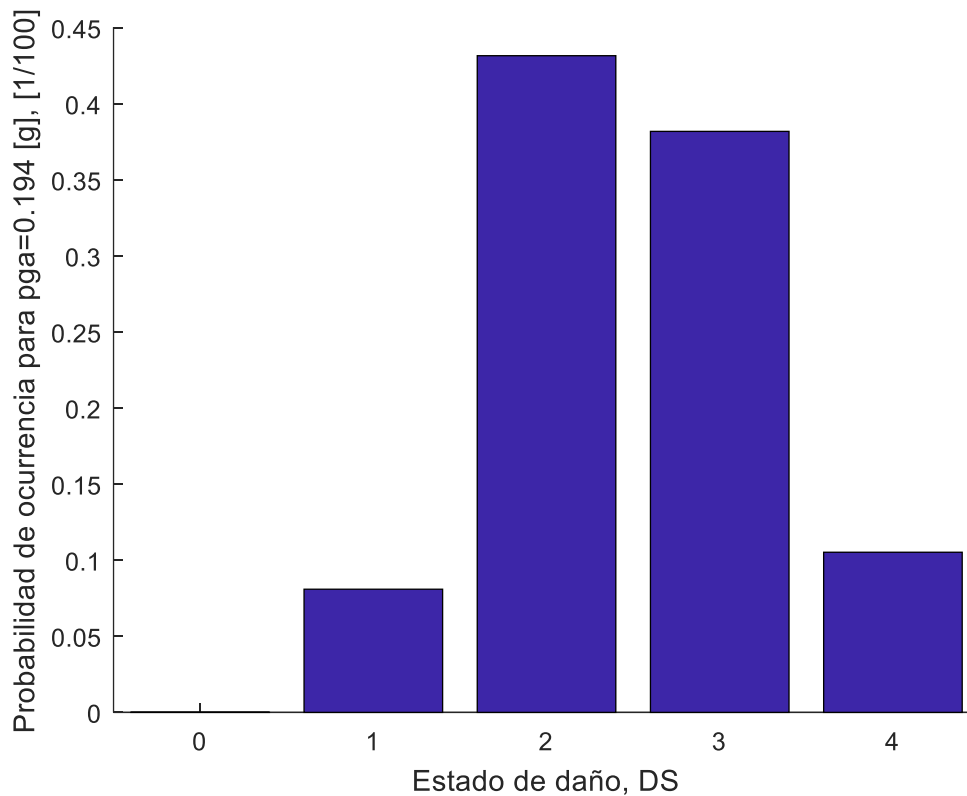


Figura 23 - Probabilidad de daño para una aceleración espectral de 0,04g en un edificio ejemplo de Barcelona, España. Fuente: Propia 2018.

Este tipo de histograma nos permite ver qué probabilidad hay de que el edificio tenga un estado de daño diferente. En este caso en particular la lectura del histograma sería la siguiente: Existe una probabilidad prácticamente nula (0%) de que el edificio no presente daño; un 7% de probabilidad aproximadamente de que el edificio muestre un daño leve, un 43% aproximadamente de que el edificio tenga un daño moderado, un 40% aproximadamente de que el daño sea severo y un 10% de que el edificio colapse.

A pesar de que en este trabajo existen dos PGAs de interés principal (i.e. 0.04 g y 0.194g), se han realizado los distintos cálculos mencionados hasta ahora para un rango de valores de

aceleración que va desde 0,02g hasta 0,3g, a cada 0.01 g. Lo anterior nos permite entender de una manera más sencilla la evolución de los distintos estados de daño por los que incursiona la estructura a manera de que la demanda (PGA) se incrementa. En el gráfico de la Figura 24 se puede observar para cada uno de los PGAs contenidos en el rango descrito anteriormente cómo se migra de estados de daño nulos o inferiores hacia estados de daño superiores e incluso colapso. Así mismo se puede observar que los estados de daño 1, 2 y 3, tienen una tendencia incremental inicialmente que, al superar un máximo, comienza a decrecer, con lo cual dicho daño se traslada al estado de daño siguiente. Los estados de daño 0 y 4 son los únicos que presentan una tendencia decreciente y creciente sin cambios en la misma, respectivamente.

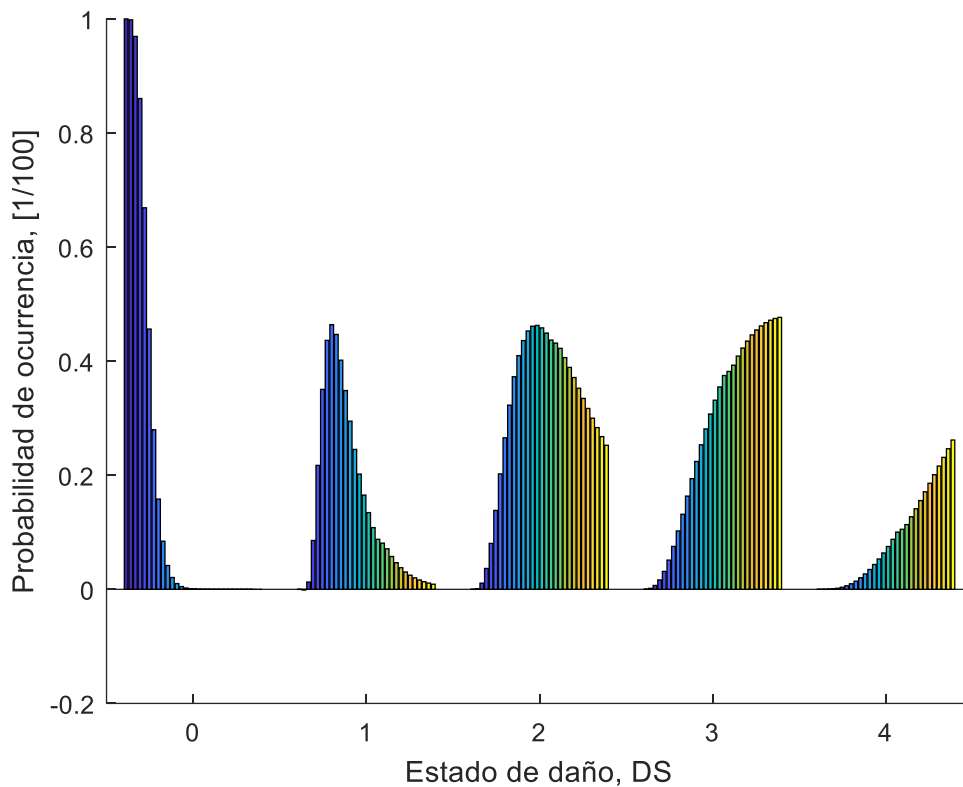


Figura 24 - Probabilidad de daño para aceleraciones de 0,02 a 0,3g en un edificio ejemplo de Barcelona, España.  
Fuente: J.A. Ávila-Haro 2018.

## 5. Cálculos y resultados

Debido a la normativa de construcción de la ciudad de Barcelona, actualmente ha habido muchas construcciones en edificios antiguos de l'Eixample para recrecerlos y aumentar sus alturas. En el plan original de Cerdà, los edificios constaban de cuatro plantas aunque debido a las distintas modificaciones realizadas a dicho plan original el número de plantas se incrementó a seis o siete, permitiéndose también la construcción en las cuatro caras de las distintas illas o manzanas, anteponiéndose a las dos caras construibles propuestas por Cerdà.

A medida de la entrada en vigor de distintas ordenanzas municipales y normativas constructivas algunas de las construcciones originales sufrieron adiciones de uno, dos, tres y hasta cuatro niveles. Esta práctica se puede observar incluso aún a día de hoy.

Siendo el recrecido de plantas una práctica común, en este estudio se ha realizado la comparativa del estudio de un edificio con siete plantas y una variante recrecida en dos plantas del mismo, con el fin de comparar la respuesta de ambos y determinar el efecto del aumento de la altura de un edificio con estas características ante un sismo..

En este apartado se muestran los resultados de los métodos aplicados para el estudio del edificio en l'Eixample y de su recrecido de dos plantas.

### 5.1 Análisis modal

Los valores correspondientes al análisis modal obtenido mediante el programa 3Muri para los dos edificios, el edificio de siete plantas (Tabla 9 y Tabla 10) y el edificio con un recrecido de dos plantas (Tabla 11 y Tabla 12), son los siguientes:

Tabla 9 - Valores del análisis modal aplicados en el edificio de 7 plantas en la dirección "X". Fuente: Propia 2018

Modo	T [s]	m <sub>x</sub> [kg]	M <sub>x</sub> [%]	m <sub>y</sub> [kg]	M <sub>y</sub> [%]
1	0,7438	2.139.460	84,24	2	0
2	0,649	73.898	2,91	2	0
3	0,2611	250129	9,85	54	0

Tabla 10 - Valores del análisis modal aplicados en el edificio de 7 plantas en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018

Modo	T [s]	m <sub>x</sub> [kg]	M <sub>x</sub> [%]	m <sub>y</sub> [kg]	M <sub>y</sub> [%]
1	0,7701	2	0	1.889.445	74,4
2	0,2569	37	0	353.718	13,93
y3	0,1505	2	0	108.943	4,29

Tabla 11 - Valores del análisis modal aplicados en el edificio de 9 plantas en la dirección "X". Fuente: Propia 2018

Modo	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]
1	1,17005	2678810	81,51	76	0
2	0,40857	468901	14,27	34	0
3	0,3403	18067	0,55	0	0

Tabla 12 - Valores del análisis modal aplicados en el edificio de 9 plantas en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018

Modo	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]
1	1,22245	78	0	2.413.473	73,43
2	0,39637	43	0	452.599	13,77

## 5.2 Capacidad vs. Demanda

Las curvas del edificio original de siete plantas obtenidas a partir del modelo creado en 3Muri en las direcciones del eje "X" (Figura 25) y del eje "Y" (Figura 26) serían las siguientes:

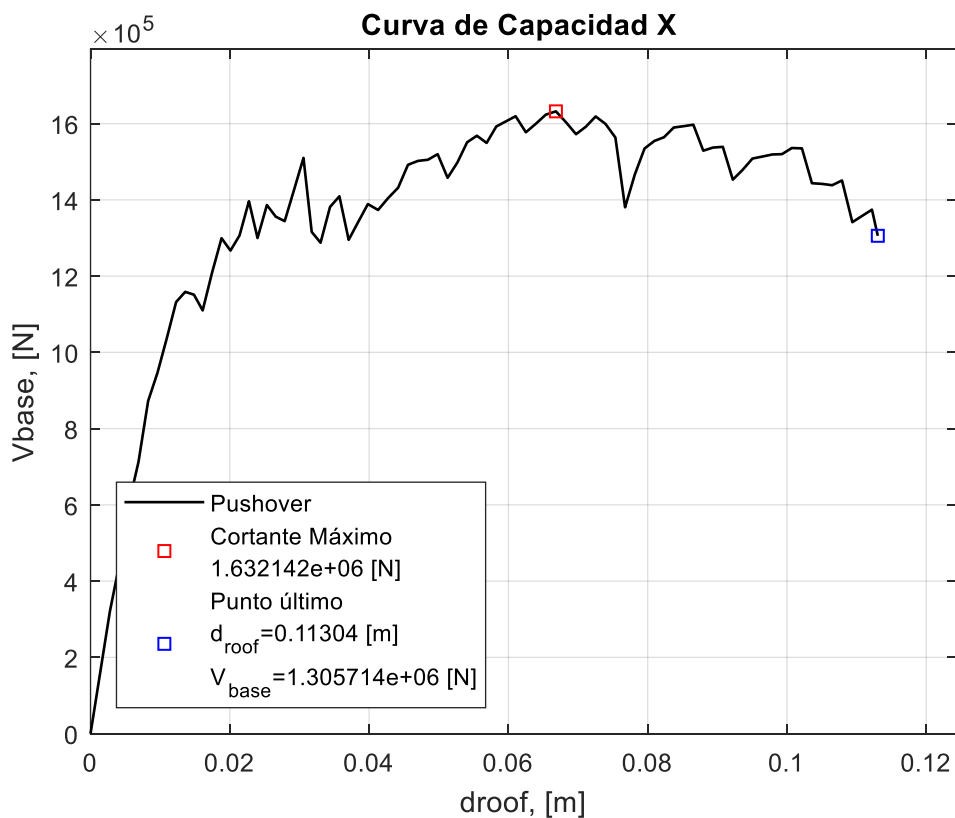


Figura 25 - Curva push-over del edificio de siete plantas en la dirección "X". Fuente: Propia 2018

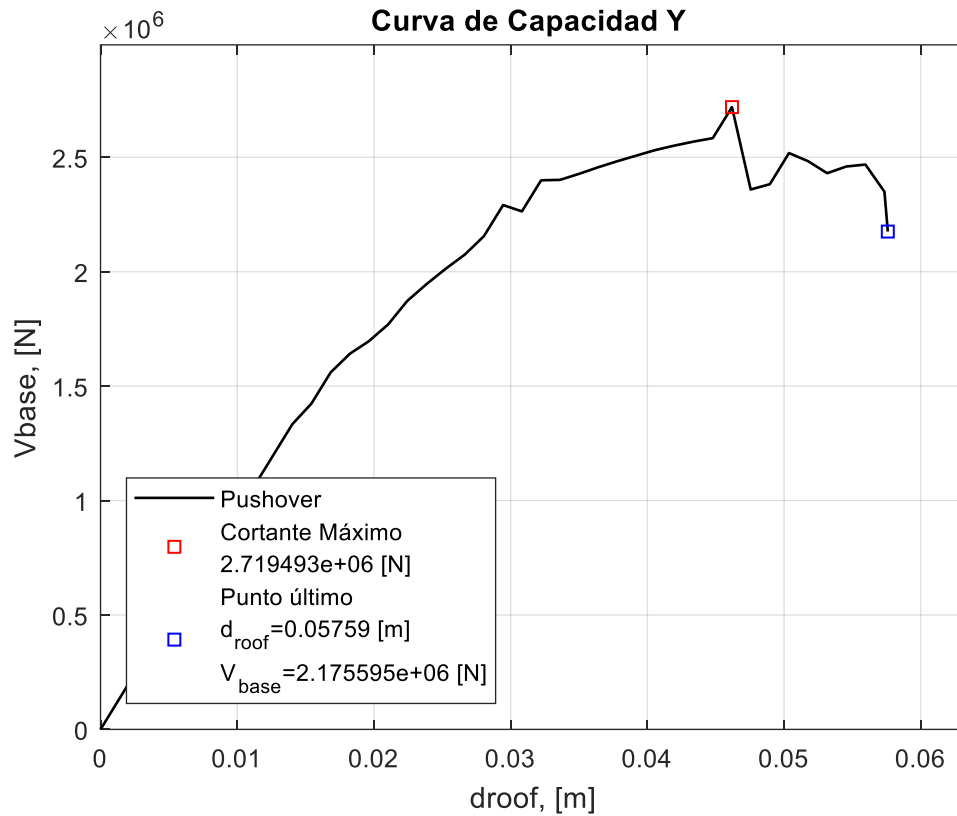


Figura 26 - Curva push-over del edificio de siete plantas en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018

Tabla 13 - Valores obtenidos en las dos curvas. Fuente: Propia 2018

Valores obtenidos	Cortante máximo [kN]	Desplazamiento en la base [cm]	Cortante en la base [kN]
Dirección "X"	1.632,14	11,30	1.305,74
Dirección "Y"	2.719,49	5,76	2.176,97

De igual forma, las curvas de capacidad del edificio recrecido en dos plantas más, en las dos direcciones se muestran en la Figura 27 y la Figura 28.

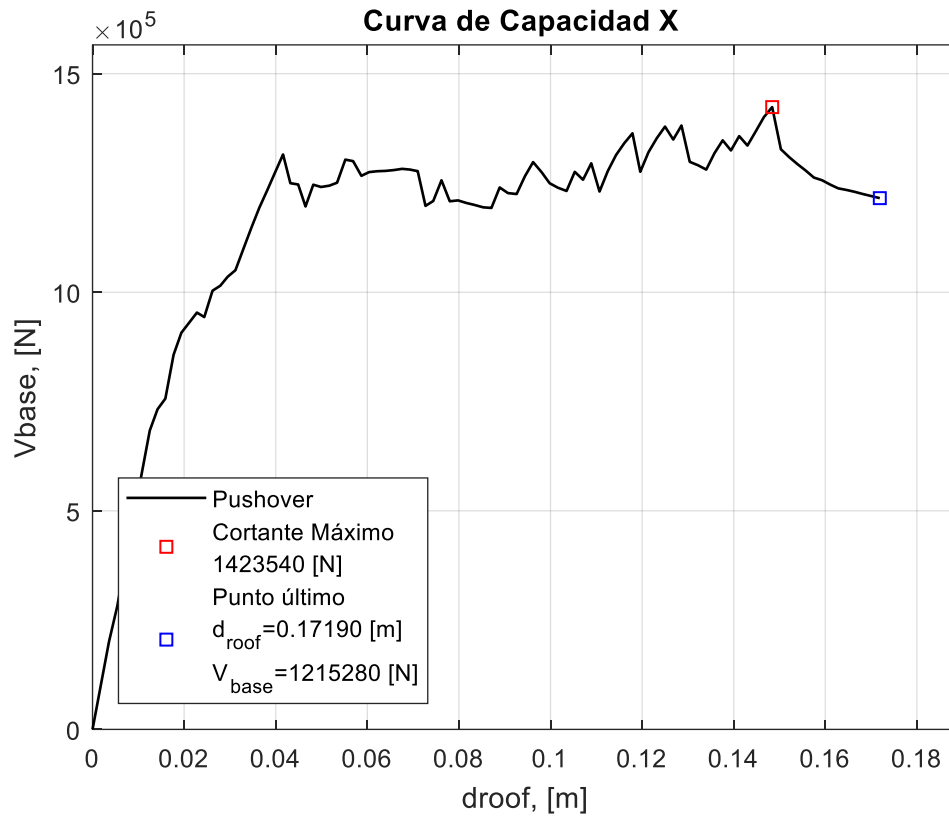


Figura 27 - Curva push-over del edificio recrecido en la dirección "X". Fuente: Propia 2018

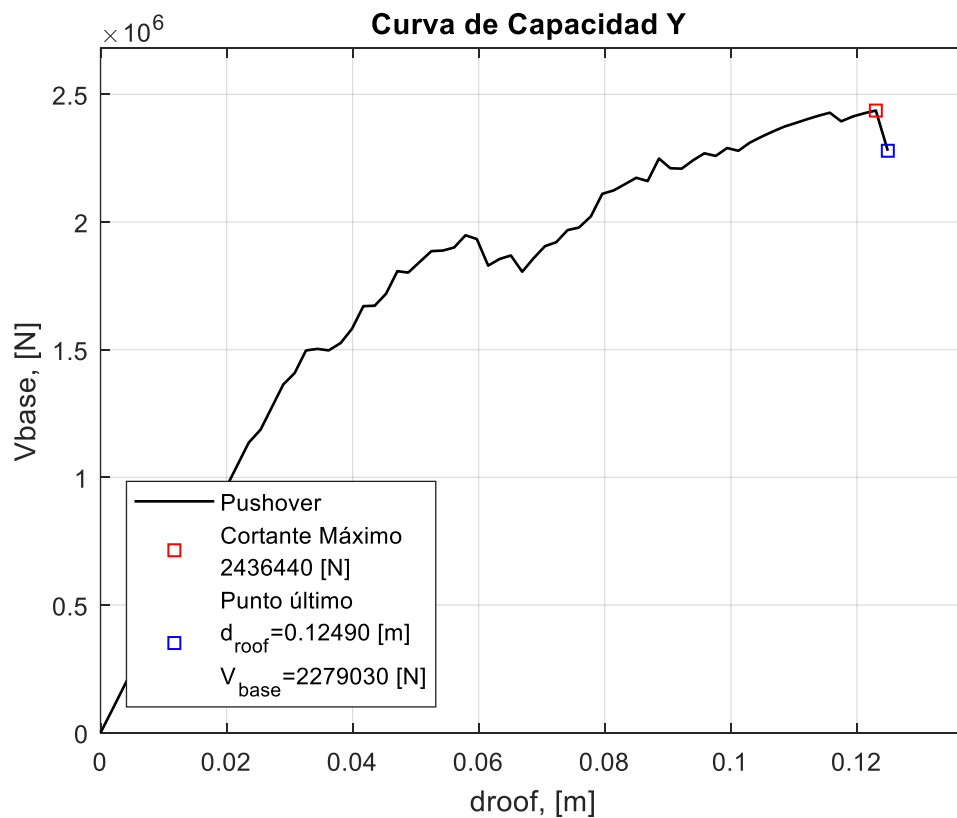


Figura 28 - Curva push-over del edificio recrecido en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018

Y en la tabla siguiente (Tabla 14) se adjuntan los valores más representativos de las dos curvas de capacidad del edificio de 9 plantas:

Tabla 14 - Valores obtenidos en las dos curvas. Fuente: Propia

Valores obtenidos	Cortante máximo [kN]	Desplazamiento en la base [cm]	Cortante en la base [kN]
Dirección "X"	1.423,54	17,90	1.215,28
Dirección "Y"	2.436,44	12,49	2.279,03

Una vez se convierten las curvas de capacidad en sus respectivos espectros de capacidad para cada dirección y edificio (de siete o de nueve plantas) se lleva a cabo la comparativa con la demanda mediante el uso de los espectros de respuesta del estudio de Irizarry, como se ha especificado en el punto 4.2.6 – Justificación del método seleccionado.

Hacer esta comparativa nos permitirá encontrar determinar el desempeño de nuestra estructura ante dicha demanda impuesta por medio del denominado *performance point*.

Los resultados que se muestran a continuación se basan en el uso de los espectros de respuesta elásticos propuestos en el trabajo de Irizarry y el uso de dos valores de aceleración del terreno (i.e. PGA). El primero de ellos correspondería a la aceleración propuesta tanto por la normativa sismorresistente española (NCSE-02) y la normativa europea (EC-8), cuyo valor es de 0.04g, mientras que el segundo valor utilizado en este estudio correspondería al esperado para el emplazamiento de nuestra estructura según la zonación hecha en diversos trabajos y empleada por Irizarry, es decir, 0,194g.

La justificación del uso de los espectros propuestos por Irizarry reside en que se trata de un estudio específico para la zona de interés, además de ser un documento más reciente que la normativa local.

En la Figura 29 y Figura 30 muestran el *performance point* obtenido para la dirección "X" con ambas aceleraciones estudiadas.

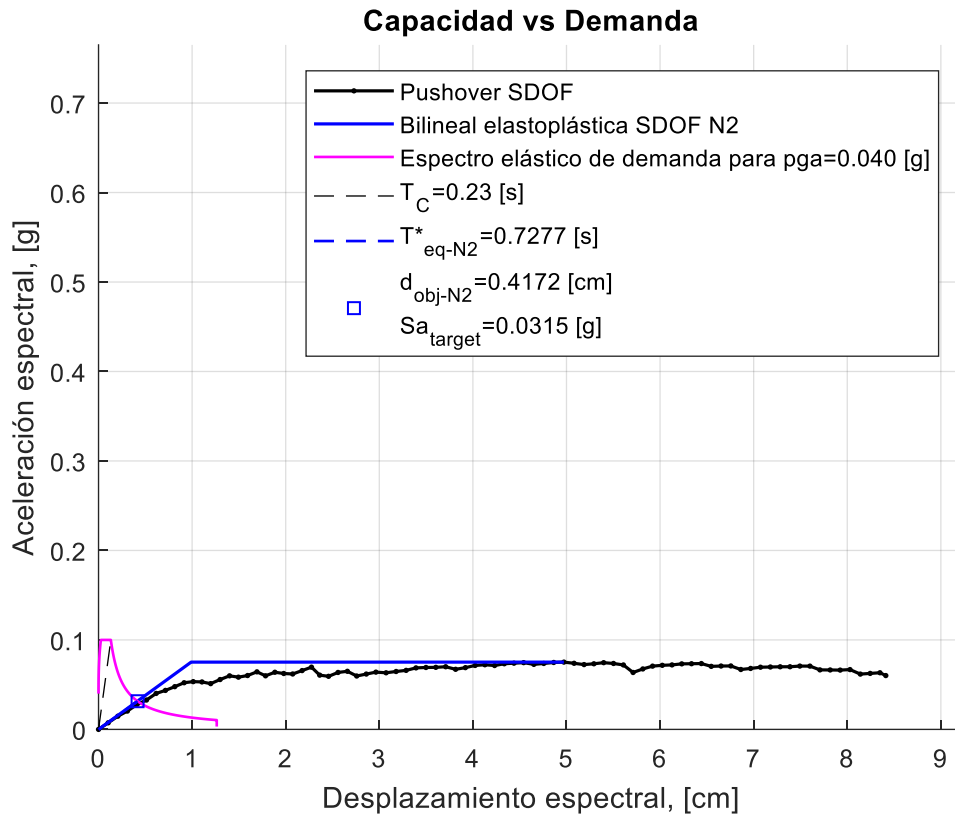


Figura 29 - Performance point para  $p_{ga}$  0,04g en la dirección "X" del edificio estudiado. Fuente: Propia 2018

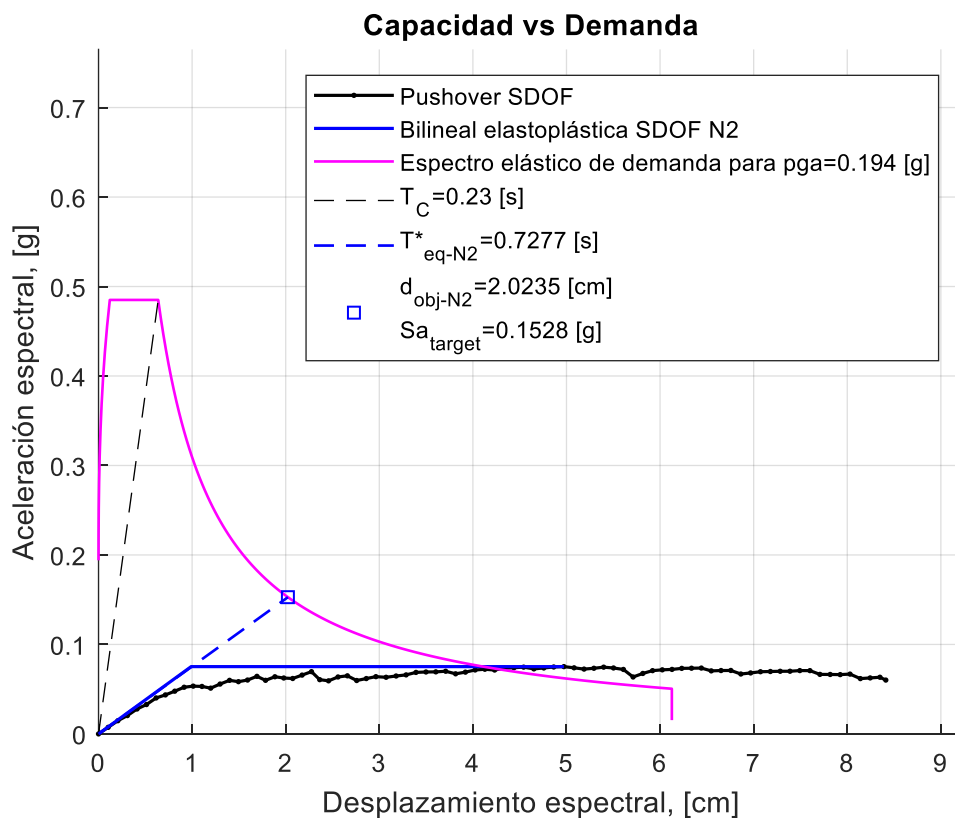




Figura 30 - Perfomance point para pga 0,194g en la dirección "X" del edificio estudiado. Fuente: Propia 2018

Y para la dirección "Y" positiva para las aceleraciones espectrales de 0,04g y 0,194g obtendríamos los siguientes puntos de desempeño:

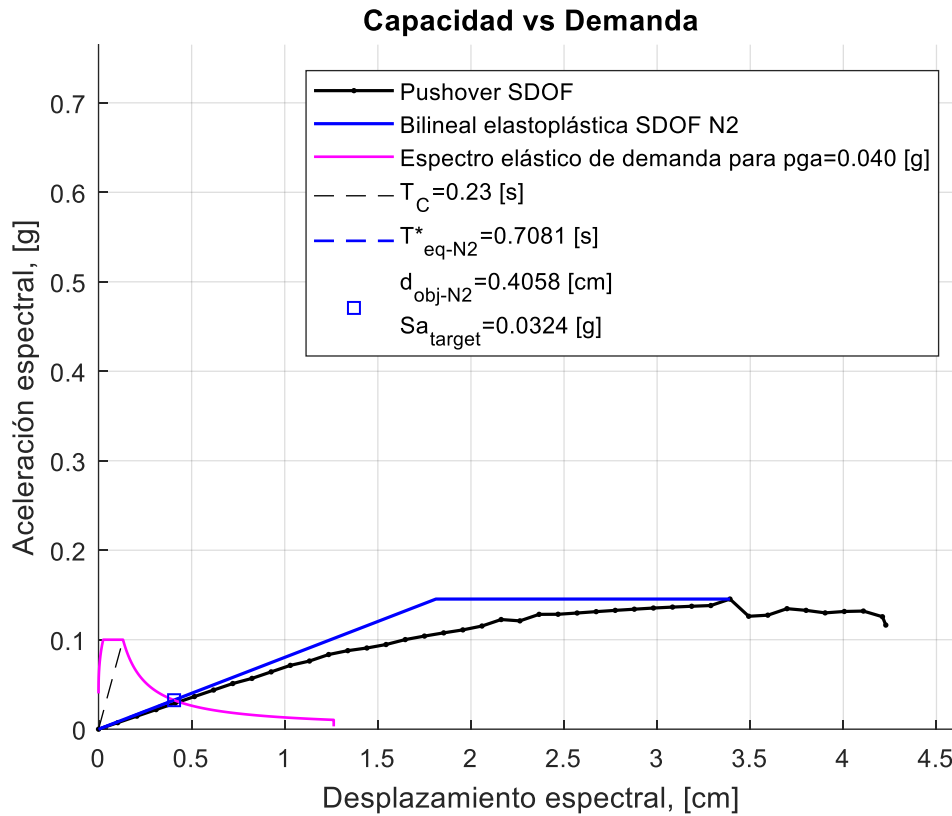


Figura 31 - Perfomance point para pga 0,04 en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018

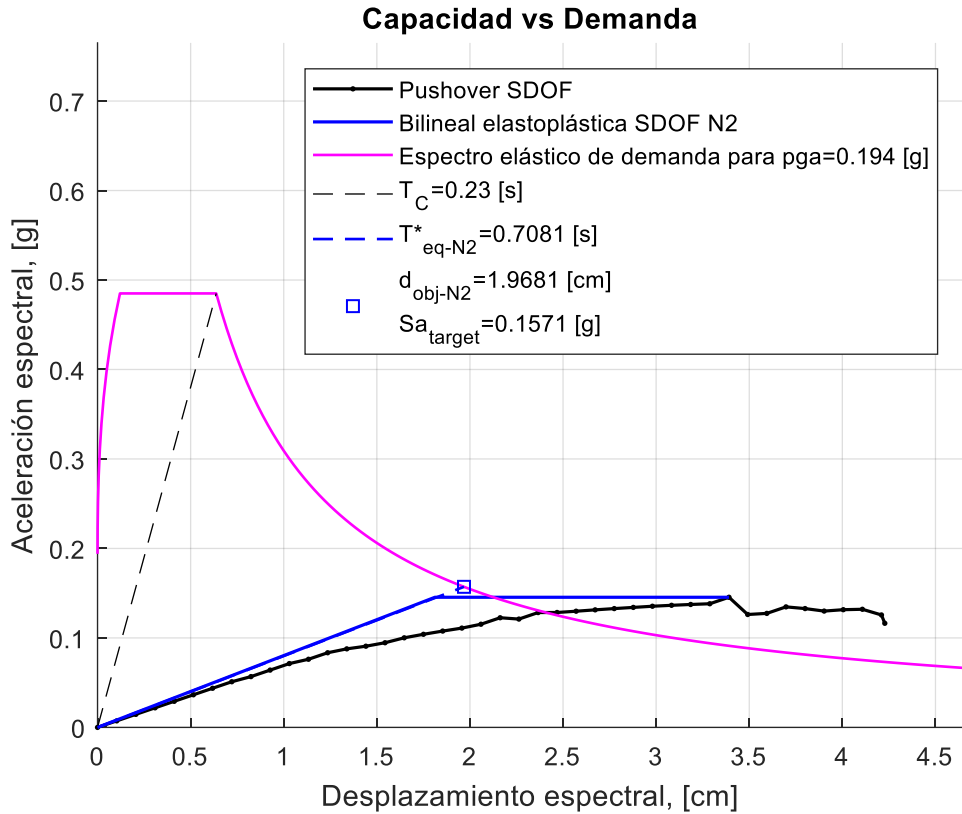


Figura 32 - Performance point para  $p_{ga} 0,194$  en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018

La Tabla 15 contiene los valores de los puntos de desempeño obtenidos en las cuatro gráficas comparándolo con las direcciones.

Tabla 15 - Valores de puntos de desempeño obtenidos. Fuente: Propia

	Dirección "X"		Dirección "Y"	
Aceleración Espectral [g]	0,04	0,194	0,04	0,194
Desplazamiento objetivo [cm]	0,42	2,02	0,4058	1,97

Se realiza el mismo procedimiento y estudio para el edificio recrecido. Se aplica el mismo procedimiento y se adjuntan las dos gráficas por cada dirección y aceleración.

Los puntos de desempeño obtenidos en las dos direcciones estudiadas se muestran en Figura 33 y la Figura 34 para la dirección "X".

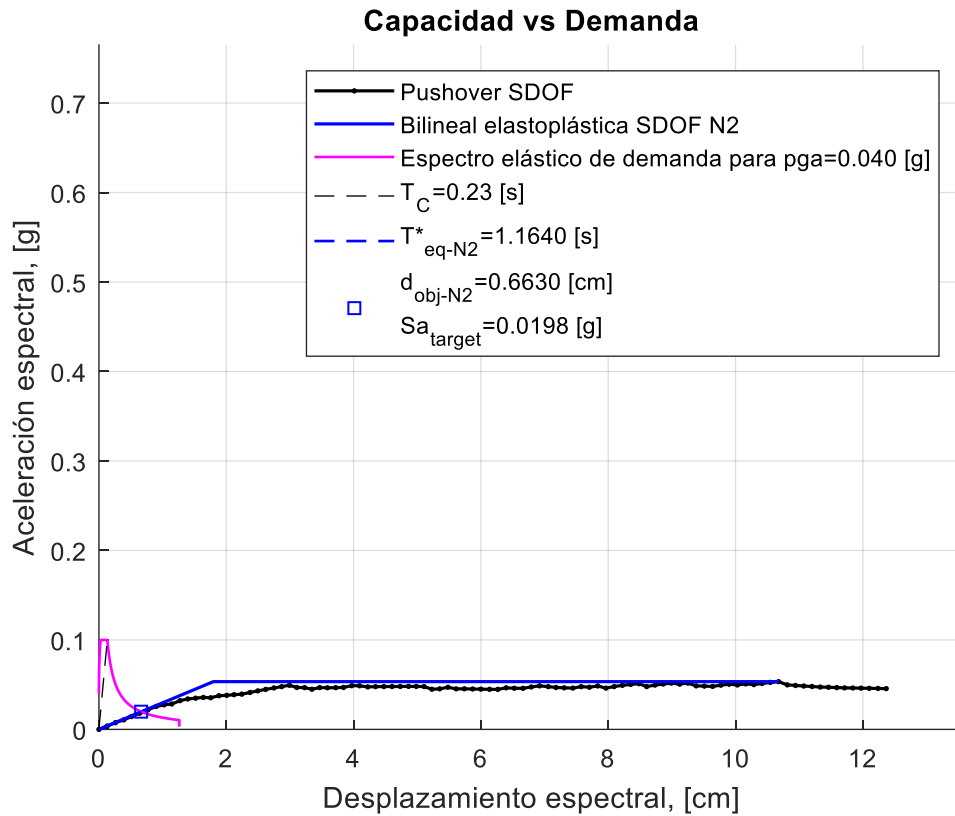


Figura 33 - Performance point del edificio recrecido para pga 0,04 en la dirección "X". Fuente: Propia 2018

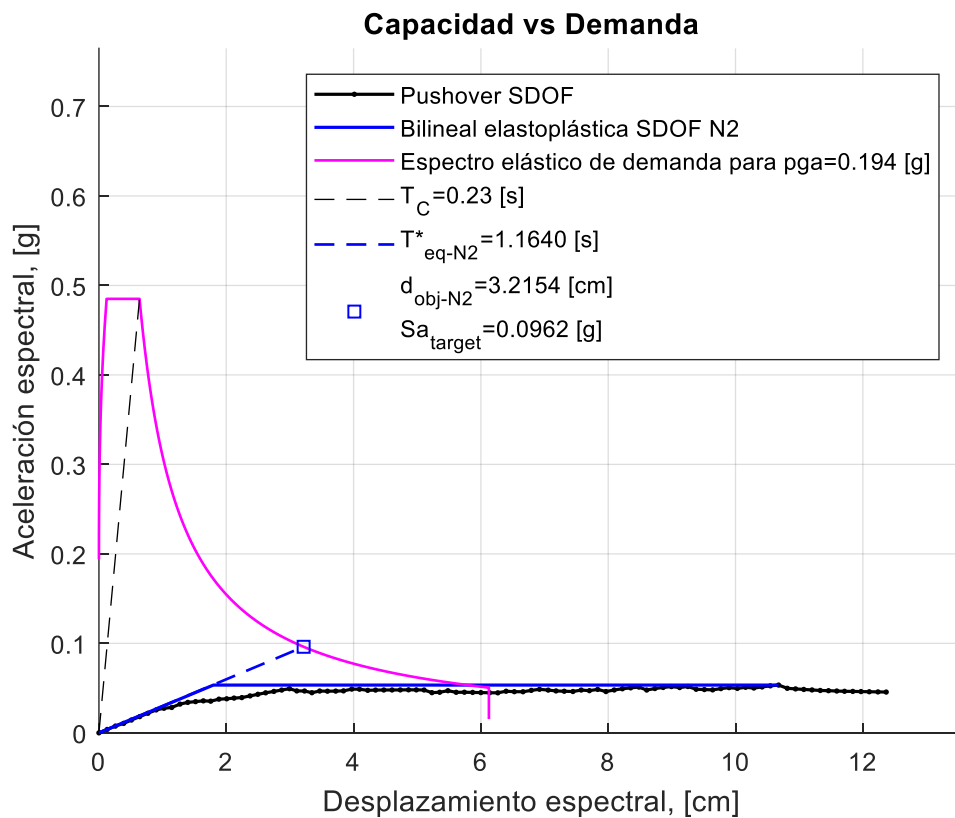


Figura 34 - Performance point del edificio recrecido para pga 0,194 en la dirección "X". Fuente: Propia 2018

Los puntos de desempeño obtenidos en la dirección "Y" de las aceleraciones espectrales de 0,04g y 0,194g se muestran a continuación en la Figura 35 y la Figura 36.

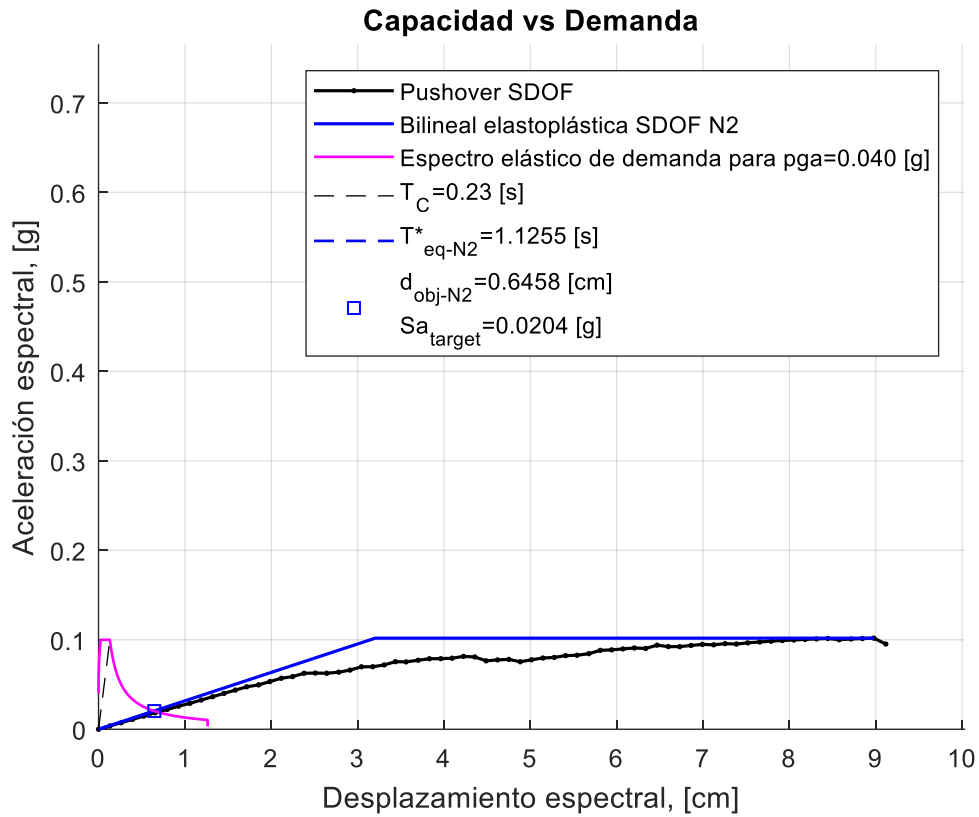


Figura 35 - Performance point del edificio recrecido para  $p_{ga}$  0,04 en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018

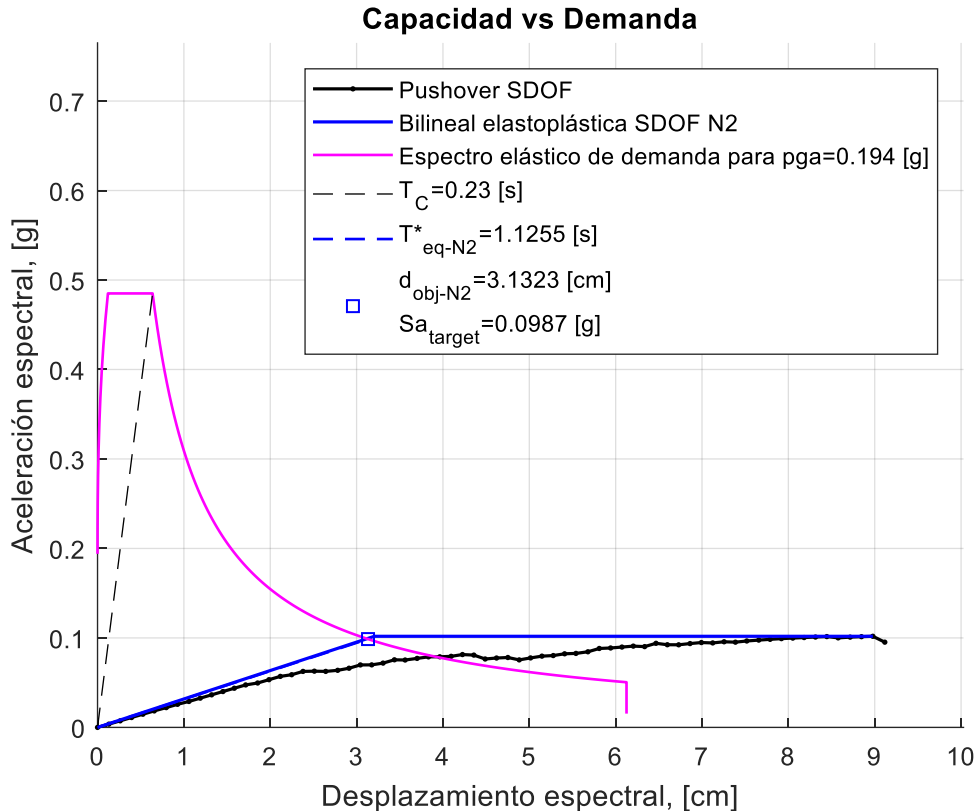


Figura 36 - Performance point del edificio recrecido para pga 0,194 en la dirección "Y". Fuente: Propia 2018

La Tabla 16 muestra los valores de los puntos de desempeño obtenidos en las cuatro gráficas para cada una de las direcciones.

Tabla 16 - Valores de puntos de desempeño obtenidos. Fuente: Propia

	Dirección "X"		Dirección "Y"	
Aceleración Espectral [g]	0,04	0,194	0,04	0,194
Desplazamiento objetivo [cm]	0,66	3,22	0,65	3,13

### 5.3 Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad indican la probabilidad de superar o igualar un estado de daño. Para mejorar el entendimiento de las curvas, se añadirá también los histogramas de daño en otro gráfico.

A continuación se muestran las curvas de fragilidad obtenidas en el edificio de 7 plantas para ambas direcciones "X" y "Y" (Figura 37). Se pueden apreciar las líneas correspondientes al punto de desempeño obtenido para las aceleraciones de interés, 0.04 g (izquierda) y 0.194 g (derecha):

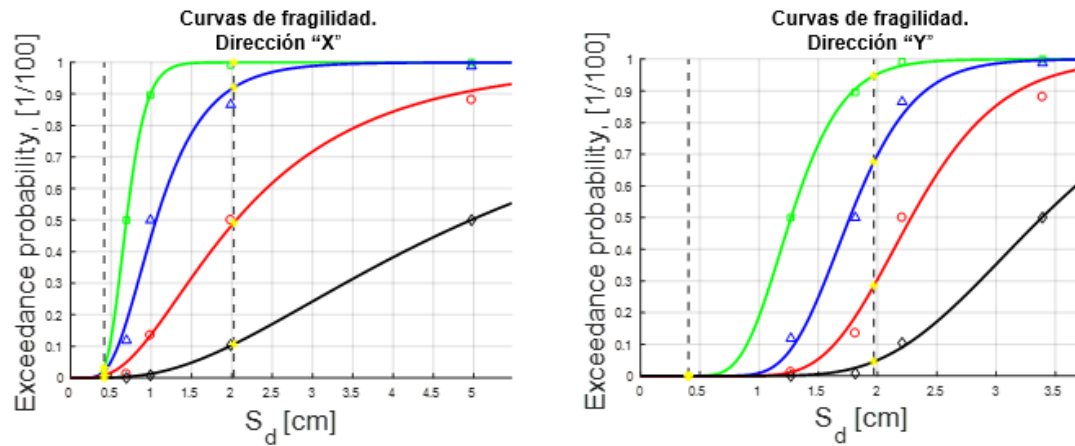


Figura 37 - Curvas de fragilidad para el edificio estudio. Fuente: Propia

La información de los gráficos anteriores queda resumido de manera sencilla en la Tabla 17:

Tabla 17 - Probabilidades de ocurrencia para cada pga. Fuente: Propia 2018

Dirección	Aceleración espectral [g]	Probabilidad de ocurrencia			
		1	2	3	4
X	0,04	3,37%	2,08%	0,77%	0,03%
	0,194	100,00%	92,05%	49,15%	10,65%
Y	0,04	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0,194	94,79%	67,58%	28,54%	4,53%

De igual manera, a continuación se muestran las curvas de fragilidad obtenidas para el edificio recrecido con dos plantas en las dos direcciones principales "X" y "Y":

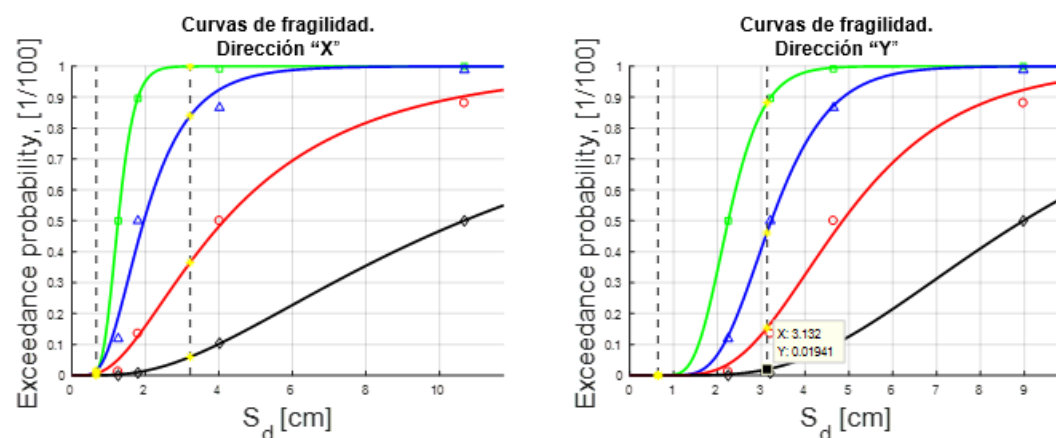


Figura 38 - Curvas de fragilidad para el edificio estudio. Fuente: Propia

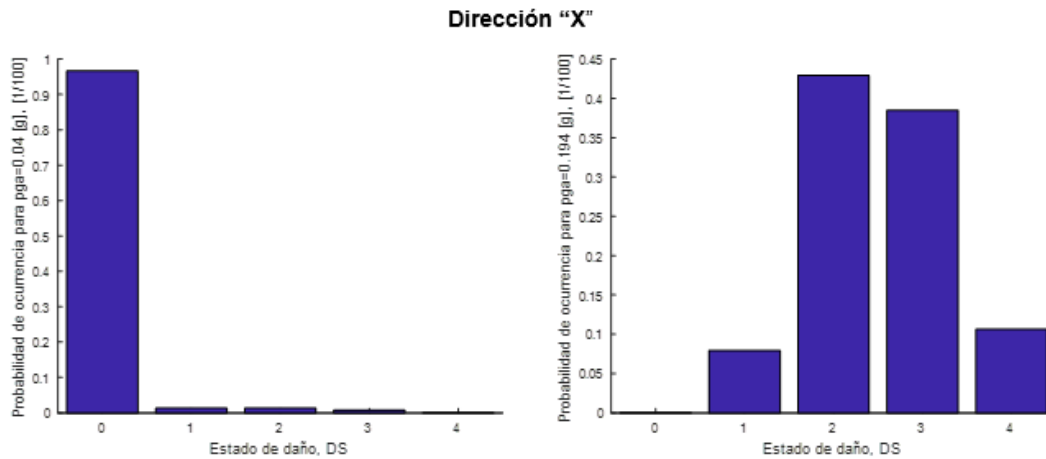
Sus respectivas probabilidades se muestran en la Tabla 18:

Tabla 18 - Probabilidades de ocurrencia para cada pga. Fuente: Propia 2018

Dirección	Aceleración espectral [g]	Probabilidad de ocurrencia			
		1	2	3	4
X	0,04	1,14%	1,54%	0,62%	0,00%
	0,194	99,96%	83,90%	36,48%	5,98%
Y	0,04	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0,194	88,17%	46,10%	15,33%	1,94%

Para mejorar la lectura de las curvas de fragilidad, se han elaborado los histogramas correspondientes de daño para cada aceleración y para cada dirección de estudio. Los histogramas agrupan las probabilidades en gráficos de columnas. Así mismo, se adjunta la tabla con la completitud de resultados para cada dirección ("X" y "Y"), en ambos sentidos para aceleración y edificio de interés.

Los histogramas obtenidos para el edificio de siete plantas se muestran en la Figura 39:



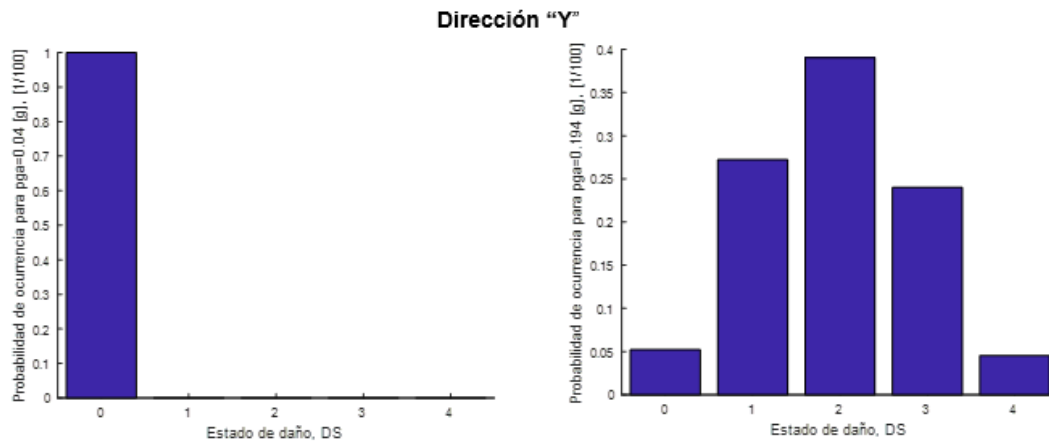


Figura 39 - Histogramas de daño para el edificio estudio. Aceleración 0,04g (izquierda) y 0,194g (derecha). Fuente: Propia 2018

La distribución de probabilidades según cada estado de daño para cada dirección y aceleración en el edificio estudio se muestran en la Tabla 19:

Tabla 19 - Distribución de la probabilidad de ocurrencia según estados de daño. Fuente: Propia 2018

Aceleración espectral [g]	Sentido	Dirección	Probabilidad de ocurrencia				
			0 No daño	1 Leve	2 Moderado	3 Severo	4 Colapso
0,04	Positivo	X	96,63%	1,28%	1,31%	0,74%	0,03%
		Y	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Negativo	X	97,48%	0,79%	1,03%	0,67%	0,02%
		Y	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,194	Positivo	X	0,01%	7,94%	42,90%	38,50%	10,65%
		Y	5,21%	27,35%	39,04%	29,01%	4,53%
	Negativo	X	0,01%	9,57%	44,92%	36,27%	9,23%
		Y	7,78%	36,63%	32,93%	19,18%	3,47%

Para el edificio con dos plantas recrecidas, los histogramas de daño serían los siguientes (Figura 40):



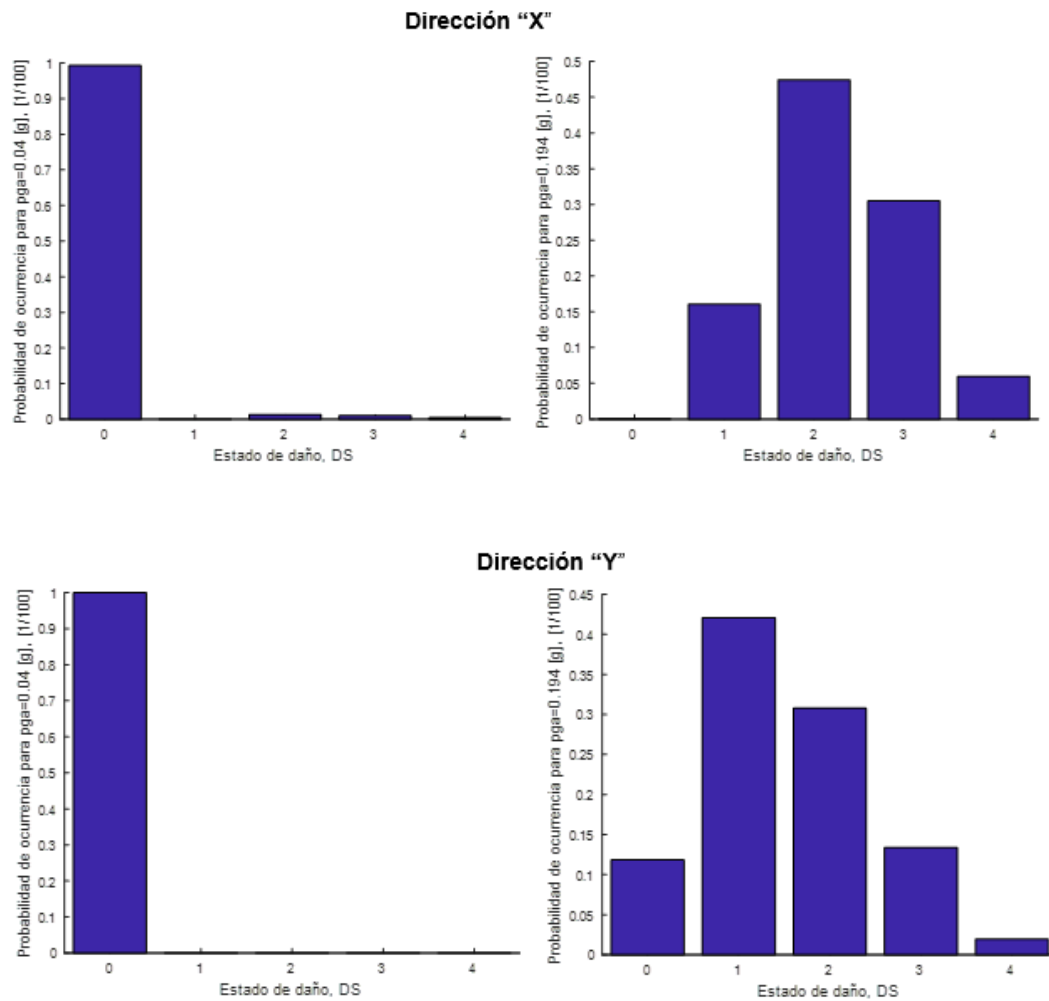


Figura 40 - Histogramas de daño para el edificio recrecido. Aceleración 0,04g (izquierda) y 0,194g (derecha). Fuente: Propia 2018

Las probabilidades según cada estado de daño para cada dirección y aceleración en el edificio recrecido con dos plantas se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20 - Distribución de la probabilidad de ocurrencia según estados de daño. Fuente: Propia 2018

Aceleración espectral [g]	Sentido	Dirección	Probabilidad de ocurrencia				
			0 No daño	1 Leve	2 Moderado	3 Severo	4 Colapso
0,04	Positivo	X	98,86%	0,00%	0,92%	0,30%	0,02%
		Y	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Negativo	X	98,79%	0,12%	0,76%	0,55%	0,02%
		Y	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,194	Positivo	X	0,04%	16,05%	47,43%	30,51%	5,98%
		Y	11,83%	42,06%	30,77%	13,39%	1,94%
	Negativo	X	0,03%	14,09%	46,70%	32,26%	6,95%
		Y	13,52%	43,18%	29,20%	12,37%	1,73%

## 6. Comparativa

El objetivo de este apartado es el análisis de los datos obtenidos desde dos puntos de vista diferentes:

- 1) Se contrastarán los datos según el estudio propuesto por Irizarry pero comparando la aceleración que propone este estudio para la ciudad de Barcelona con la que recomiendan las dos normativas vigentes.
- 2) Se comparará la respuesta del edificio original y su versión recrecida en dos plantas, lo cual refleja una práctica común de la ciudad de Barcelona.

### 6.1 Análisis Modal

Se pueden observar algunos cambios tanto en los periodos fundamentales de ambos edificios, así como en la masa activada por cada uno de ellos. Lo anterior es un comportamiento esperable, ya que a medida que el edificio crece en altura, su periodo debería de hacer lo mismo. Por otro lado vemos un ligero descenso en la cantidad de masa movilizada en los modos fundamentales, lo cual se ocasiona principalmente por la redistribución de la misma al activarse modos superiores.

### 6.2 Curvas de capacidad

Las curvas generadas en las dos direcciones de cada edificio muestran ciertas diferencias. Es claramente visible que el comportamiento del edificio recrecido es más dúctil, lo cual queda reflejado en un ligero descenso del cortante máximo que a su vez conlleva un incremento notable en el desplazamiento último del mismo. (Tabla 21):

Tabla 21 -Comparativa de los valores obtenidos en las curvas push-over. Fuente: Propia 2018

	Valores obtenidos	Cortante máximo [kN]	Desplazamiento en la base [cm]	Cortante en la base [kN]
<b>Original</b>	<b>Dirección "X"</b>	1.632,14	11,3	1.305,74
	<b>Dirección "Y"</b>	2.719,49	5,76	2.176,97
<b>Recrecido</b>	<b>Dirección "X"</b>	1.423,54	17,9	1.215,28
	<b>Dirección "Y"</b>	2.436,44	12,49	2.279,03

### 6.3 Curvas fragilidad

En este apartado haremos una doble comparativa de los resultados obtenidos. Como se ha comentado en la introducción de este apartado, observaremos el comportamiento entre los dos valores de aceleración del terreno propuestos por las normativas y estudios, y luego el comportamiento entre los dos tipos de edificio, con o sin recrecido.

La tabla siguiente recoge los valores obtenidos a partir de las curvas de fragilidad para el edificio de siete niveles

Tabla 22 - Probabilidad de ocurrencia según estado de daño. Fuente: Propia

Aceleración espectral [g]	Sentido	Dirección	Probabilidad de ocurrencia				
			0 No daño	1 Leve	2 Moderado	3 Severo	4 Colapso
0,04	Positivo	X	96,63%	1,28%	1,31%	0,74%	0,03%
		Y	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Negativo	X	97,48%	0,79%	1,03%	0,67%	0,02%
		Y	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,194	Positivo	X	0,01%	7,94%	42,90%	38,50%	10,65%
		Y	5,21%	27,35%	39,04%	29,01%	4,53%
	Negativo	X	0,01%	9,57%	44,92%	36,27%	9,23%
		Y	7,78%	36,63%	32,93%	19,18%	3,47%

Si comparamos las aceleraciones propuestas tanto por las dos normativas expuestas y el estudio de microzonación de la ciudad de Barcelona, los resultados son completamente distintos. El uso de los valores propuestos por la normativa española y europea, 0.04 g, conllevaría a concluir que la estructura no sufriría daño alguno (estado de daño 0).

En cambio, en el estudio de microzonación, el valor propuesto para la aceleración es de 0,194g. Este valor es prácticamente cinco veces el valor propuesto por las normativas. Los resultados para esta aceleración quedan distribuidos en su mayoría en estados de daño no-nulos.

La distribución de estos daños puede observarse distinta dependiendo de la dirección de análisis, con lo cual podemos observar que la dirección X concentra los mayores porcentajes en los estados de daño moderado y severo, respectivamente. Por otro lado, la dirección Y concentra los principales porcentajes en los estados de daño leve y moderado, respectivamente.

Así mismo, para el edificio de nueve niveles la Tabla 23 recoge los valores obtenidos:

Tabla 23 - Probabilidad de ocurrencia según estado de daño. Fuente: Propia

Aceleración espectral [g]	Sentido	Dirección	Probabilidad de ocurrencia				
			0 No daño	1 Leve	2 Moderado	3 Severo	4 Colapso
0,04	Positivo	X	98,86%	0,00%	0,92%	0,30%	0,02%
		Y	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Negativo	X	98,79%	0,12%	0,76%	0,55%	0,02%
		Y	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,194	Positivo	X	0,04%	16,05%	47,43%	30,51%	5,98%
		Y	11,83%	42,06%	30,77%	13,39%	1,94%
	Negativo	X	0,03%	14,09%	46,70%	32,26%	6,95%
		Y	13,52%	43,18%	29,20%	12,37%	1,73%

Si comparamos las dos tablas de resultados obtenidos para los dos edificios se puede ver que la tendencia es muy parecida. Comparando las aceleraciones propuestas y la del estudio realizado por Irizarry son resultados muy diferentes, como en el anterior edificio. Si se usaran los valores propuestos por las dos normativas la estructura no sufriría ningún tipo de daño.

En cambio, tal y como ocurre con el edificio de siete niveles, cuando nos fijamos en la aceleración propuesta en el estudio de microzonación de Barcelona de 0,194g, la distribución se divide entre los cinco estados de daño, siendo los estados de daño leve y moderado los que concentran mayor probabilidad de daño para la dirección X, y los estados de daño moderado y severo, para la dirección Y.

Haciendo la comparativa entre los edificios de 7 y 9 niveles, podemos observar que la distribución de daños tiende a desfasarse hacia los estados de daño inferiores para ambas direcciones del edificio recrecido, con lo cual podemos suponer que existen elementos que anteriormente no se veían solicitados, cuya aportación en cuestiones de resistencia se refleja positivamente en el comportamiento del edificio.

## 7. Conclusiones

Como se ha podido observar a través de las distintas comparativas y resultados mostrados en apartados anteriores, la selección de la demanda es algo que debe hacerse contando con la información más adecuada, actualizada y focalizada posible. Una primera conclusión relacionada con lo anterior es la necesidad de revisión que tiene la normativa sismoresistente española (NCSE-02) referente a los valores de aceleración propuestas para diversas zonas. Hemos podido observar que para el edificio estudiado, seleccionando los valores propuestos por la Norma NCSE-02 y un sismo de las características propuestos por los estudios más recientes específicos para la ciudad, el resultado sería prácticamente de ningún daño en la estructura, en cambio, adoptando los valores correspondientes a dichos estudios para la ciudad, se prevé que los sismos puedan afectar la ciudad de Barcelona con casi cinco veces más aceleración, lo cual se ve reflejado directamente en la respuesta de la estructura y su incursión en estados de daño superiores no despreciables.

Una segunda conclusión que podemos obtener del análisis de los datos es que tanto la disposición interior de los muros, la geometría en planta, la calidad de los materiales y otros aspectos relacionados con el modelado del edificio pueden impactar de manera importante en los resultados si no se seleccionan adecuadamente.

Finalmente, también ha de destacarse que, a pesar de que a priori se podría pensar que el comportamiento de un edificio recrecido en dos plantas sería menos adecuado, los resultados nos indican que se tiende a migrar a estados de daño inferiores al compararlo con el edificio original de siete niveles. Lo anterior puede justificarse mediante desplazamientos superiores que permiten entender su comportamiento como un comportamiento más dúctil. Lo anterior habría de verificarse mediante el análisis de los diversos elementos que componen cada pared de carga, así como la manera y localización en que el daño evoluciona en uno y otro modelo.

Aunque este estudio se ha realizado con el edificio totalmente aislado y sin considerar que es un edificio de “banda”, el cual de acuerdo a las prácticas comunes de la época compartiría sus paredes medianeras con ambos edificios a sus costados, se entiende que es un caso del todo realista y, que a día de hoy, suele presentarse con mayor frecuencia ya que las nuevas prácticas constructivas permiten el derribo de estructuras manteniendo sólo su fachada y desligándolas de las estructuras aledañas .

Aspectos como la consideración de la variabilidad de los materiales en las distintas plantas y elementos deberían incorporarse en estudios adicionales para así poder considerar las

incertidumbres en las distintas propiedades mecánicas, cuya raíz principal reside en la forma heterogénea de cocción de dichos materiales en los hornos existentes en la época, por mencionar alguna línea futura de investigación.

## 8. Presupuesto

Considerando las tareas realizadas para llevar a cabo el estudio propuesto y para la elaboración de todas las tareas descritas, se han determinado unos honorarios en base al trabajo realizado desde el inicio del proyecto.

Los honorarios se obtenidos mediante la consideración de los siguientes criterios:

- Tarifa por horas de Ingeniero Junior: **20 €/h**
- Trabajo realizado durante 30 días laborables a jornada completa de 8 horas diarias: **4.800€**
- Obtención de la licencia de trabajo para Matlab Student R2018a: **35€**
- Obtención de la licencia de trabajo para 3Muri: **900€**

Estas cantidades no incluyen IVA y para los gastos extra que se pudiera incurrir, se añade una provisión de fondos **10%** de la cantidad total a aportar.

Atendiendo a los criterios anteriores, los honorarios ascenderían a la siguiente cantidad:

Concepto	Base imponible	% IVA	Total
Tarifa de trabajo para ingeniero junior	6.000,00 €	21%	7.260,00 €
Licencia de trabajo Matlab	35,00 €	21%	42,35 €
Licencia de trabajo 3Muri	900,00 €	21%	1.089,00 €
Gastos extras (10%)	693,50 €	21%	839,14 €

Subtotal	7.628,50 €		9.230,49 €
----------	------------	--	------------

Base imponible	7.628,50 €
IVA	21,00%
	1.601,99 €

<b>TOTAL FACTURA</b>	<b>9.230,49€</b>
----------------------	------------------

## 9. Bibliografía

- ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* (SSC-96-01). Retrieved from California, U.S.A.:
- Eurocode-8-1. (2004). Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings: Comité Européen de Normalisation.
- Fajfar, P. (1999). Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*(28), 979-993.
- Fajfar, P., & Fischinger, M. (1988, August 2-9, 1988). N2 - A method for non-linear seismic analysis of regular buildings. Paper presented at the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan.
- Fajfar, P., & Gašperšič, P. (1996). The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 31-46.
- Galasco, A., Lagomarsino, S., & Penna, A. (2002). TREMURI Program: Seismic Analyser of 3D Masonry Building. University of Genoa.
- González-Drigo, R., Avila-Haro, J., Barbat, A., Pujades, L., Vargas, Y., Lagomarsino, S., & Cattari, S. (2015). Modernist URM buildings of Barcelona. Seismic Vulnerability and Risk Assessment. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), 214-230.  
doi:10.1080/15583058.2013.766779
- Lantada, N. (2007). *Aplicación de Técnicas GIS a Estimación de Riesgos Naturales*. (PhD), Universitat Politècnica de Catalunya.
- Milutinovic, Z. V., & Trendafiloski, G. S. (2003). WP4: Vulnerability of Current Buildings *RISK-UE Project Handbook* (pp. 111).
- NCSE-02. (2002). *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación*. Retrieved from Madrid, España:
- Paricio, A. (2001). *Secrets d'un Sistema Constructiu*. Barcelona, España: Edicions UPC.
- S.T.A. DATA. (2012). 3muri Program. <http://www.3muri.com/>.